

**ANÁLISE DE MODELOS DE CÁLCULO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM PRFC**

DANIEL MARLON RODRIGUES GUEDES

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO – 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE MODELOS DE CÁLCULO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM PRFC**

DANIEL MARLON RODRIGUES GUEDES

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO – 2018
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

FICHA CATALOGRÁFICA

GUEDES, DANIEL MARLON RODRIGUES

Análise de Modelos de Cálculo de Vigas de Concreto Armado Reforçadas ao Cisalhamento com PRFC [Distrito Federal] 2018.

xviii, 71p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de

Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto Armado

2. Vigas Reforçadas

3. Cisalhamento

4. PRFC

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUEDES, D.M. (2018). Análise de Modelos de Cálculo de Vigas de Concreto Armado Reforçadas ao Cisalhamento com PRFC. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniel Marlon Rodrigues Guedes.

TÍTULO: Análise de Modelos de Cálculo de Vigas de Concreto Armado Reforçadas ao Cisalhamento com PRFC.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Daniel Marlon Rodrigues Guedes
QE 32, Conjunto M, Casa 23 – Guará 2
CEP: 71.065-131 Brasília – DF – Brasil
e-mail: daniel.marlonr@gmail.com

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE MODELOS DE CÁLCULO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM PRFC**

DANIEL MARLON RODRIGUES GUEDES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Marcos Honorato de Oliveira, *D.Sc.* (UnB)
(Orientador)

Prof. Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, *D.Sc.* (UnB)
(Examinador interno)

Eng. André Vinícius Leyser de Souza, *M.Sc.* (UnB)
(Examinador externo)

BRASÍLIA / DF, 29 DE NOVEMBRO DE 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela graça de ter me permitido chegar ao fim deste ciclo, tendo me sustentado em todos os momentos e dado condições para que isso fosse possível.

Aos meus pais Haroldo Guedes e Elzani Guedes, que tanto investiram em mim como pessoa e em meus estudos. Obrigado por terem se doado tanto. À minha irmã Jéssica Guedes e à minha noiva Letícia Andrade pelo apoio, incentivo e compreensão durante esses anos. Aos meus sogros Raul Simões e Diana Andrade, que tanto me incentivaram e impulsionaram a acreditar em mim no começo deste ciclo.

Ao Professor Marcos Honorato pelo apoio e investimento feitos na minha formação, pela confiança, incentivo, apoio e por sua amizade. Obrigado pelo aprendizado profissional como também pessoal.

Aos amigos do GETEC, da Concreta e da Engenharia Civil, que fizeram parte da minha formação, especialmente aos Doutorandos Manoel Mangabeira e Hamilton Costa, pelo apoio e contribuição neste trabalho, e à Mestre em Estruturas Ailín Fernández pelo apoio e por me permitir utilizar a sua dissertação como ponto inicial para a minha pesquisa.

Aos colegas, professores e funcionários da Universidade de Brasília.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação como bacharel, muito obrigado.

RESUMO

Polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) são comumente utilizados no reforço de estruturas de concreto armado, por possuírem propriedades desejáveis e favoráveis a esse tipo de aplicação, como baixo peso específico, alta resistência à tração, baixa relaxação e pela capacidade de aumentarem ou recuperarem a resistência de elementos estruturais de concreto. Sabe-se que em geral o reforço ideal de elementos estruturais é aquele que leva à ruptura por flexão, evitando a ruptura por cisalhamento, uma vez que esta apresenta menor deformação de ruptura em relação àquela. O emprego do PRFC é uma alternativa para se obter esse comportamento desejado na ruptura, entretanto, o emprego desse tipo de reforço no Brasil é ainda limitado, em parte, devido ao custo elevado com o material e devido à ausência de uma normalização nacional que oriente o emprego desse tipo de reforço.

Em vista disso, objetivou-se analisar e verificar metodologias de cálculo para o reforço ao cisalhamento de vigas com faixas de PRFC coladas externamente, com o fim de verificar quais modelos melhor representam os resultados experimentais. Foram analisadas 137 vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com PRFC, provenientes de 14 trabalhos encontrados na literatura, publicados entre 2000 e 2016. Foram previstos os tipos e as cargas de ruptura, calculados a partir de diferentes combinações entre modelos de cálculo para se determinar a resistência ao cisalhamento das vigas sem o reforço e modelo de cálculo da parcela contribuinte do reforço na resistência final. Por fim, foram feitas análises sobre os resultados experimentais e os resultados previstos por cada combinação teórica.

Concluiu-se que as combinações entre os modelos de cálculo analisados podem ser utilizados efetivamente para prever a capacidade resistente real de uma viga reforçada, dentro das margens de erro de cada modelo. Segundo os fatores analisados e a metodologia empregada, a combinação NBR 6118-Chen & Teng apresentou resultados um pouco melhores que as demais.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	1
LISTA DE FIGURAS.....	2
LISTA DE SÍMBOLOS	3
1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. CARACTERÍSTICAS DO REFORÇO COM PRFC.....	9
2.1.1. TIPOS DE REFORÇO	9
2.1.2. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA À RUPTURA AO CISALHAMENTO DE VIGAS REFORÇADAS.....	13
2.1.3. COMPORTAMENTO DE VIGAS REFORÇADAS.....	14
2.1.4. MODOS DE RUPTURA.....	16
2.2. MODELOS DE CÁLCULO.....	18
2.2.1. DISPOSIÇÕES DA ABNT NBR 6118 (2014): PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO (ABNT, 2014).....	19
2.2.2. DISPOSIÇÕES DO ACI 318 (2011): REQUERIMENTOS DE NORMA PARA CONCRETO ESTRUTURAL (ACI, 2011)	21
2.2.3. DISPOSIÇÕES DE ZSUTTY (1968): PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (ZSUTTY, 1968).....	22
2.2.4. DISPOSIÇÕES DO FIB – BULLETIN 14 (2001): REFORÇO DE PRF COLADOS EXTERNAMENTE EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO (FIB, 2001).....	23
2.2.5. DISPOSIÇÕES DO ACI 440.2R (2017): GUIA PARA DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE SISTEMAS DE PRF COLADOS EXTERNAMENTE PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO (ACI, 2017)	24

2.2.6. DISPOSIÇÕES SEGUNDO CHEN E TENG (2003): CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM FRP (CHEN & TENG, 2003).....	26
2.3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS	29
3. METODOLOGIA	41
4. RESULTADOS E ANÁLISE	43
4.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA	43
4.2. ANÁLISE PARAMÉTRICA	51
5. CONCLUSÕES	63
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 – Reforços de vigas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono. (Site: Reforço de Estruturas, 2016).....	10
Tabela 2.2 – Modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC coladas externamente.....	18
Tabela 2.3 – Equações utilizadas no cálculo segundo a NBR 6118 (2014).	20
Tabela 2.4 – Equações utilizadas no cálculo segundo a ACI 318 (2011).	21
Tabela 2.5 – Equações utilizadas no cálculo segundo as prescrições de Zsutty.	23
Tabela 2.6 – Equações utilizadas no cálculo segundo o <i>fib – Bulletin 14</i>	24
Tabela 2.7 – Equações utilizadas no cálculo segundo o ACI 440.2R (2017).	26
Tabela 2.8 – Equações utilizadas no cálculo segundo o modelo de Chen e Teng.....	28
Tabela 2.9 – Características gerais das vigas analisadas.	31
Tabela 2.10 – Características do reforço das vigas analisadas.	36
Tabela 3.1 – Critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013) – <i>Demerit Point Classification – DPC</i>	42
Tabela 4.1 – Análise estatística das vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC.	44
Tabela 6.1 – Características gerais das vigas propostas.	66
Tabela 6.2 – Características da armadura de flexão das vigas propostas.	66
Tabela 6.3 – Características do reforço das vigas propostas.	67
Tabela 6.4 – Resistência ao cisalhamento das vigas propostas, segundo a combinação NBR 6118-Chen & Teng.	67

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2-1 – Aplicações do reforço ao cisalhamento com PRFC em vigas de concreto armado. (Site: Zaldigain, 2016)	9
Figura 2-2 – Algumas das formas disponíveis das fibras de carbono, em mantas e lâminas. (Site: Viapol, 2016)	11
Figura 2-3 – Materiais componentes do sistema de reforço com fibra de carbono. (Loturco, 2017).	12
Figura 2-4 – Classificação dos compósitos quanto às características geométricas da fibra. (MOLINA, 2013)	12
Figura 2-5 – Alternativas de colocação da fibra em vigas, para reforço ao cisalhamento (ACI, 2017).	13
Figura 2-6 – Colapso de vigas por ruptura e por descolamento do PRFC (TENG, 2008).	17
Figura 2-7 – Treliça de Mörsch. (Site AltoQi, 2010).....	19
Figura 2-8 – Ilustração das principais variáveis do reforço ao cisalhamento segundo o modelo de CHEN e TENG (2003).	27
Figura 2-9 – Vista longitudinal da viga.	30
Figura 2-10 – Vista da seção transversal da viga.	30
Figura 4-1 – Carga Experimental de Ruptura x Método de Colagem do PRFC.....	43
Figura 4-2a – Distribuição de resultados das combinações a partir da NBR 6118.....	46
Figura 4-3 – Diagrama de Caixa de V_{exp}/V_{teo} por Combinação de Cálculo.	49
Figura 4-4 – Penalidade de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013), aplicada em cada combinação.	50
Figura 4-5 – Distribuição das vigas segundo o critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013).	51
Figura 4-6 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e d	53
Figura 4-7 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e a/d	56
Figura 4-8 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e f_c	58
Figura 4-9 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e ρ_f	60
Figura 4-10 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e o número de camadas de reforço.	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

a	Distância entre o apoio da viga e o ponto de aplicação do carregamento
A_s	Área total de aço da armadura longitudinal
A_{sw}	Área total de aço da armadura transversal (estribos)
A_{fv}	Área do PRFC no plano transversal à direção principal das fibras
b_w	Largura da viga
b_f	Ver h_f
d	Altura útil da viga
d_f	Altura útil do PRFC
d'_f	Coordenada do limite superior do PRFC
D_{frp}	Fator de distribuição da tensão no PRFC, quando interceptado pela fissura de cisalhamento
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do PRFC
E_{fu}	Módulo de elasticidade último do PRFC
f_c	Resistência do concreto à compressão
f'_c	Resistência específica mínima do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão
f_{fe}	Tensão efetiva no PRFC
f_{frp}	Tensão resistente do PRFC
$f_{frp,ed}$	Tensão resistente efetiva, ou média, do PRFC que intercepta a fissura de cisalhamento no estado limite último
f_u	Tensão resistente última do aço dos estribos
f_{yw}	Tensão de escoamento do aço dos estribos

f_{ywk}	Resistência característica de escoamento do aço
h	Altura da viga
h_f	Espessura da mesa de vigas T
$h_{frp,e}$	Altura efetiva do PRFC
k_1	Fator de modificação que depende principalmente da resistência do concreto
k_2	Fator de modificação que depende principalmente da resistência do concreto
k_v	Fator de modificação que depende principalmente da resistência do concreto
L_e	Comprimento de ancoragem efetivo
$L_{máx}$	Máximo comprimento de ancoragem
M_{sd}	Momento fletor solicitante de cálculo
n	Número de camadas de mantas de PRFC
PRFC	Polímero reforçado com fibra de carbono
s	Espaçamento entre estribos
s_f	Espaçamento entre faixas de PRFC
t_f	Espessura do PRFC
V_c	Parcela resistente contribuinte do concreto
V_{exp}	Força cortante resistente experimental, ou medida
V_f	Parcela resistente contribuinte do PRFC
V_{Rd2}	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto
V_{Rd3}	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal
V_{sd}	Força cortante solicitante de cálculo
V_{sw}	Parcela resistente contribuinte da armadura transversal
V_{teo}	Força cortante resistente teórica, ou calculada
w_f	Largura do PRFC
z_b	Coordenada do limite inferior da altura efetiva do PRFC
z_t	Veja d'_f

Letras gregas

α	Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal da peça
α_f	Inclinação entre a direção principal das fibras do PRFC e o eixo longitudinal da peça
α_{v2}	Coeficiente que depende da resistência do concreto
β	Ver α_f
β_l	Fator de ajuste em função do comprimento de ancoragem
β_w	Fator de ajuste em função da largura e espaçamento do PRFC
γ_b	Coeficiente de minoração de projeto
$\varepsilon_{fd,e}$	Deformação de efetiva de projeto do PRFC
ε_{fe}	Deformação efetiva do PRFC
ε_{fu}	Deformação de ruptura do PRFC
θ	Inclinação das diagonais de compressão em relação ao eixo longitudinal da peça; inclinação da fissura de cisalhamento em relação ao eixo longitudinal da peça
λ	Fator de modificação
ρ_f	Taxa de PRFC
ρ_s	Taxa de aço da armadura longitudinal
$\sigma_{frp,max}$	Tensão máxima resistente de projeto do PRFC
ϕ	Fator de redução da capacidade resistente
ψ_f	Fator de redução da capacidade resistente do PRFC

1. INTRODUÇÃO

As construções de concreto armado muitas vezes têm sua vida útil reduzida devido a fatores como a mudança na funcionalidade das edificações, a deterioração da estrutura com o decorrer do tempo, a ocorrência de impactos ou devido a falhas na etapa de projeto e execução, passando a edificação a um nível de desempenho inferior ao desejado, necessitando-se, assim, que seja realizado um reforço estrutural, de maneira a elevar ou recuperar a capacidade resistente das peças.

Os tipos de reforço mais utilizados são: reforço mediante adição de concreto simples ou armado, encamisamento, concreto projetado, reforço por adição de perfis metálicos, reforço por adição de chapas metálicas coladas e reforço por colagem de lâminas ou mantas de compósitos de fibras.

O método abordado neste trabalho faz uso de compósitos de fibra para elevar ou recuperar a capacidade resistente das peças. Esses compósitos consistem em uma fibra de resina polimérica, conhecidos também como polímeros reforçados com fibra. A aplicação dessa técnica no Brasil, no entanto, é ainda limitada. Isso se deve, em parte, pela ausência de uma normalização nacional que oriente o seu uso.

Desta forma, este trabalho objetiva avaliar modelos de cálculo para o reforço de vigas de concreto armado ao cisalhamento com PRFC, a partir da comparação dos resultados teóricos de cada modelo com resultados experimentais. Contribuindo, cientificamente, para a difusão do uso desta técnica de reforço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERÍSTICAS DO REFORÇO COM PRFC

O reforço com PRFC apresenta como vantagens propriedades inerentes à fibra, como a alta resistência à tração, baixa relaxação e imunidade à corrosão (PÉREZ, 2016). Existem três tipos fundamentais de compósito de fibra: os reforçados com fibra de vidro, com fibra de aramida e com fibra de carbono. Este trabalho se concentra no reforço ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono, denominados PRFC – polímero reforçado com fibra de carbono. Na Figura 2-1 estão exemplificados alguns usos desse tipo de reforço de vigas ao cisalhamento.



Figura 2-1 – Aplicações do reforço ao cisalhamento com PRFC em vigas de concreto armado.
(Site: Zaldigain, 2016)

O uso de polímeros reforçados com fibra como sistema de reforço se popularizou, principalmente, após o barateamento das matérias primas e a queda dos custos industriais (MACHADO & MACHADO, 2015).

2.1.1. TIPOS DE REFORÇO

Fibras de carbono apresentam em sua composição de 80% e 95% desse elemento. O carbono em materiais compósitos se apresenta em fibras acrílicas, obtidas a partir da poliacrilonitrila (PAN), um polímero capaz de fornecer propriedades mecânicas desejáveis em materiais usados como reforço. Um processo com três etapas é utilizado para produzir fibras com faixas gráficas orientadas preferencialmente ao eixo da fibra: orientação do polímero precursor PAN por estiramento, carbonização das fibras e grafitação. Comparadas às fibras de vidro, as fibras

de carbono oferecem maior rigidez, maior resistência a altas temperaturas, menor peso específico e maior valor no mercado.

Na Tabela 2.1, estão expostas as propriedades das fibras de carbono, classificadas entre seus principais tipos.

Tabela 2.1 – Reforços de vigas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono.
(Site: Reforço de Estruturas, 2016)

Tipo de fibra		Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Específica Última (%)
Fibra de Carbono	Alta resistência	3.500 - 4.800	215 - 235	1,4 – 2,0
	Ultra-alta resistência	3.500 - 6.000	215 - 235	1,5 - 2,3
	Alto módulo de elasticidade	2.500 - 3.100	350 - 500	0,5 - 0,9
	Ultra-alto módulo de elasticidade	2.100 - 2.400	500 - 700	0,2 - 0,4

Define-se como material compósito, um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, tendendo a obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta (MENDOÇA, 2005). O reforço com PRFC utilizado em peças estruturais é, portanto, um compósito, um material composto, uma vez que se encaixa nessa definição. A alta resistência das fibras de pequeno diâmetro combinada com a ductilidade da matriz de polímeros produz um material forte e capaz de ser utilizado para suportar o carregamento exigido de um elemento estrutural (SHACKELFORD, 2008). Esse compósito apresenta três principais fases constituintes:

- **Adesivos:** Resinas empregadas na colagem do sistema compósito, estabelecendo um meio de transferência das tensões entre o substrato de concreto e as mantas ou lâminas de fibra, ou mesmo entre diversas camadas de mantas ou lâminas.

- **Matriz:** Resina que aglomera o reforço, para lograr as propriedades desejadas, que trabalha transmitindo os esforços da peça estrutural para o reforço. Além disso, a matriz protege a fibra contra a abrasão e corrosão do ambiente e proporciona maior flexibilidade à fibra, permitindo que seja utilizada de acordo com a forma desejada.
- **Reforço:** Material específico que aporta alta resistência mecânica, rigidez, dureza e é determinante para se obter as principais propriedades mecânicas do compósito. Suas principais características são alta resistência à tração específica, elevado módulo de elasticidade e alta fragilidade.

Na Figura 2-2 estão mostradas algumas formas disponíveis no mercado da fibra de carbono e na Figura 2-3 estão indicados os materiais componentes do sistema de reforço com PRFC.



Figura 2-2 – Algumas das formas disponíveis das fibras de carbono, em mantas e lâminas.
(Site: Viapol, 2016)

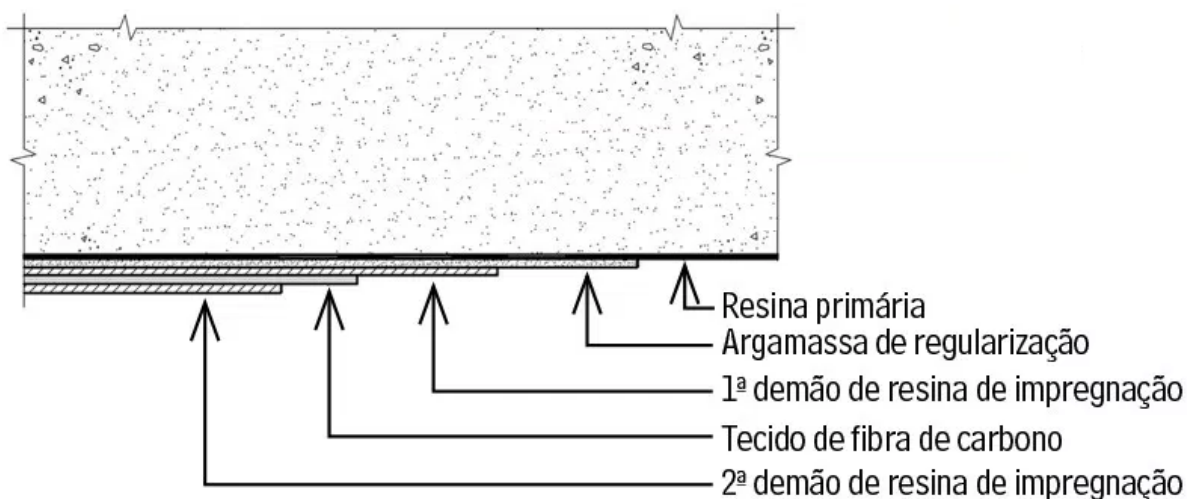
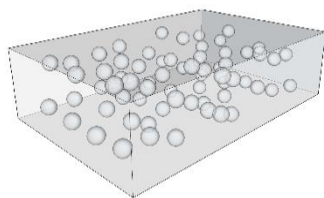


Figura 2-3 – Materiais componentes do sistema de reforço com fibra de carbono. (Loturco, 2017).

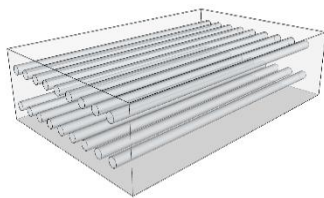
As características finais do material composto são afetadas em função das propriedades das fases constituintes do compósito, da proporção de cada uma delas, da geometria (forma, tamanho e orientação) e do grau de dispersão da fase dispersa (PÉREZ, 2016).

Podemos classificar os tipos de reforço quanto às características geométricas da fibra que compõe o compósito, exemplificados na Figura 2-4:

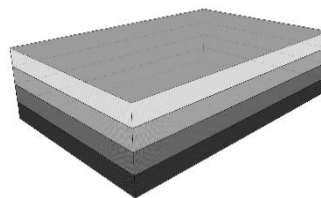
- Compósitos por partículas: Partículas da fase reforço dispersos em uma matriz.
- Compósitos fibrosos: Fibras distribuídas e orientadas em uma matriz.
- Compósitos laminados: Camadas alternadas de fibra de forma laminar.



Compósitos por partículas



Compósitos fibrosos



Compósitos laminados

Figura 2-4 – Classificação dos compósitos quanto às características geométricas da fibra. (MOLINA, 2013)

Podemos também classificar os tipos de reforço quanto à forma de execução em vigas, conforme mostrado na Figura 2-5, para reforço ao cisalhamento. O primeiro tipo, envolvimento completo, é o mais efetivo (AKROUSH, 2016), porém o mais difícil de se executar, no caso de vigas, devido à presença da laje, enquanto que o reforço com colagem de faixas nas laterais é o mais suscetível ao descolamento do PRF. Esse é um tipo de fixação que confina o elemento reforçado, então, pode ser mais efetivo ainda em peças cuja necessidade de reforço se dê principalmente por demandas de capacidade resistente do concreto, e não do aço. O reforço em “U”, por sua vez, apresenta um desempenho intermediário entre os outros dois tipos (BEBER, 2003). Os mais utilizados são os reforços do tipo em “U” e nas laterais. São encontrados também reforços do tipo “L”, que se assemelham ao do tipo em “U”, porém uma das laterais da viga não possui reforço.

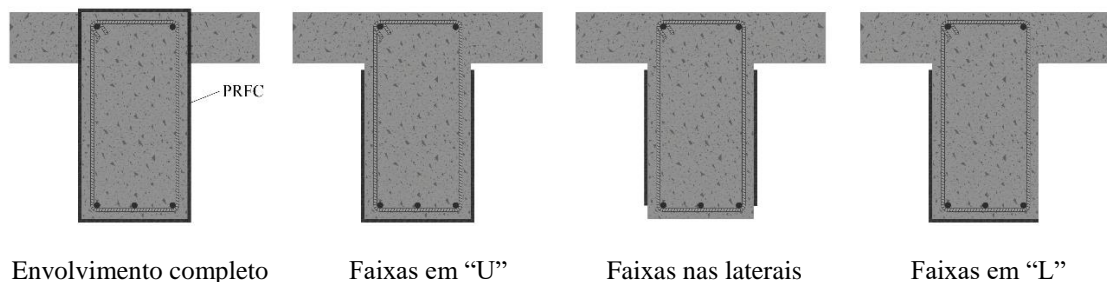


Figura 2-5 – Alternativas de colocação da fibra em vigas, para reforço ao cisalhamento (ACI, 2017).

2.1.2. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA À RUPTURA AO CISALHAMENTO DE VIGAS REFORÇADAS

Diferentes variáveis influenciam a resistência à ruptura ao cisalhamento de vigas reforçadas com PRFC. Esta influência nem sempre é linear e varia de acordo com o parâmetro estudado. Os parâmetros relacionados apenas à viga de concreto armado, que exercem esta influência, são:

- Largura da viga: b_w
- Altura útil da viga: d
- Resistência do concreto à compressão: f_{ck}
- Taxa de armadura de transversal: A_{sw} / s
- Resistência do aço da armadura transversal: f_{yw}

Os parâmetros relacionados ao próprio sistema de reforço com PRFC são:

- Espessura da manta de fibra: t_f
- Largura da manta de fibra: w_f
- Espaçamento entre faixas de mantas: s_f
- Inclinação das fibras em relação ao eixo longitudinal: α
- Deformação de ruptura da fibra: ε_{fu}
- Módulo de elasticidade da manta: E_f
- Altura útil da manta de fibra: d_f
- Ancoragem do reforço na viga
- Número de camadas de mantas
- Método de reforço: envolvimento completo, lateral, “em U” ou “em L”

Torna-se importante conhecer a influência destes parâmetros afim de aprimorar o sistema de reforço e o modelo de cálculo de acordo com o comportamento real da estrutura. Além disso, alguns parâmetros podem apresentar um ponto ótimo de utilização, tal como o número de camadas de manta, que a partir de certo número, não apresenta mais um aumento nas propriedades desejadas, tal como provisão da capacidade resistente ao cisalhamento.

2.1.3. COMPORTAMENTO DE VIGAS REFORÇADAS

Muitos estudos, realizados desde a década de 1990, tem demonstrado que vigas reforçadas ao cisalhamento rompem, principalmente, em dois modos de ruptura: ruptura por tração do PRF e descolamento do PRF dos lados da viga, dependendo de como ela foi reforçada (CHEN & TENG, 2003). Da recorrência de ruptura por descolamento, surge a importância de uma efetiva ancoragem, para que o reforço atue de forma eficiente.

Uma diferença básica entre vigas reforçadas externamente e vigas com armadura transversal convencional está no fato de que estas possuem, por meio da forma e posição dos estribos internos, uma ancoragem suficientemente garantida e, desta forma, o mecanismo de ruptura é

determinado pela resistência à tração dos estribos. (SWAMY & MUKDHOPADHYAYA, 1999). Por outro lado, nas vigas reforçadas externamente, o mecanismo de ruptura está associado à eficiência da ancoragem, ou a falta dela, ao invés da resistência à tração do material de reforço, como é o caso dos estribos. (BEBER, 2003)

O pesquisador Maeda (MAEDA, et al., 1997) demonstra que para comprimentos de ancoragem superiores a 100 mm, a força de tração desenvolvida na fibra não se altera. A razão para isto está no fato de que nos estádios iniciais de carregamento a carga é suportada pela aderência na região adjacente ao ponto de carregamento (KHALIFA, 1998). Se o descolamento ocorre nessa região, devido à fissuração no concreto, a área de aderência ativa é substituída por uma nova área de aderência. Esse mecanismo se repete até que o descolamento se propague por todo o comprimento do PRFC. Portanto, a tensão de aderência é somente transferida nessa área de aderência ativa. O comprimento do PRFC que inclui essa área é chamado de comprimento de aderência efetiva.

Como veremos adiante, a maioria dos modelos para dimensionamento de vigas reforçadas ao cisalhamento, como é o caso dos modelos analisados neste trabalho, consideram que a resistência de uma viga reforçada é dada pela soma das parcelas de contribuição do concreto, da armadura transversal e do reforço externo. Tal consideração está em concordância com uma observação importante: “O princípio geral de dimensionamento ao cisalhamento considera que o concreto comprimido fornece a resistência primária ao cisalhamento e que, a resistência adicional ao cisalhamento deve ser fornecida através de uma armadura transversal, geralmente sob a forma de estribos internos. Alguns dos resultados de pesquisas disponíveis até o momento apontam que a mesma metodologia pode ser empregada no caso do reforço externo” (BEBER, 2003).

Os sistemas de reforço com PRFC deveriam ser dimensionados para resistir aos esforços de tração, mantendo a compatibilidade de deformação entre o reforço e a superfície de concreto, porém, é aceitável que o reforço tome os esforços de compressão se eles decorrem de inversões de momento ou de mudanças no padrão do carregamento (PÉREZ, 2016).

Segundo BEBER (2003), “quando o elemento de concreto alcança sua capacidade de resistência ao cisalhamento, um pouco antes de seu colapso, o reforço externo com PRF é alongado na direção principal das fibras em um nível que, em geral, é menor que sua deformação de ruptura”.

Alguns modelos de cálculo do reforço com PRF propõem equações para estimar essa deformação específica efetiva.

Ainda, de acordo com BEBER (2003), “observa-se ainda, que, no estado limite último, um certo grau de descolamento do reforço é esperado, mesmo que a ruptura não ocorra simultaneamente ao descolamento. Isto é atribuído à excessiva deformação no reforço, que resulta em uma incompatibilidade de deformações com o substrato de concreto, conduzindo à fissuração. A fissuração, por sua vez, ocasiona concentrações de tensão que produzem o descolamento. Portanto, pode-se conceber que a deformação efetiva depende fortemente do comprimento de ancoragem, de sua relação com o comprimento de ancoragem efetivo (através do qual as tensões de aderência na interface concreto/reforço se desenvolvem) e a relação entre o comprimento de ancoragem efetivo e o ‘comprimento de desenvolvimento’ (necessário para alcançar a ruptura do reforço por tração antes do descolamento)”.

Estudos experimentais demonstram que a grande maioria das vigas reforçadas com envolvimento completo romperam devido à ruptura do PRF. Embora o descolamento tenha ocorrido antes, neste caso a ruptura do PRF é que controla a resistência ao cisalhamento (CHEN & TENG, 2003). Esse comportamento em vigas reforçadas com envolvimento completo se deve à maior eficácia da ancoragem presente nesse método de colagem, levando o compósito à sua máxima capacidade de suporte. Além disso, a contribuição do PRF à resistência ao cisalhamento depende da sua configuração e orientação (BUKHARI, 2010).

Quando o descolamento ocorre, este causa a perda do confinamento das fissuras, que passam a se propagar até a ruptura final. Como o reforço permite com que a formação da primeira fissura ocorra apenas com um alto nível de carregamento, uma vez que ela é formada, ela se propaga rapidamente, causando a ruptura final, que tipicamente ocorre por descolamento (AKROUSH, 2016).

2.1.4. MODOS DE RUPTURA

Rupturas por cisalhamento em estruturas de concreto armado são, naturalmente, catastróficas e repentinas e, por isso, devem ser evitadas na etapa de dimensionamento. Essa é a razão pela qual se dimensionam vigas para romperem por flexão e, então, verifica-se a resistência ao cisalhamento, uma vez que rupturas por flexão são mais dúcteis, permitindo a redistribuição de

tensões e o aviso aos ocupantes da estrutura para a possibilidade de colapso. (REBEIZ, 1999) (BEBER, 2003).

Como explicitado anteriormente, vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC rompem, principalmente, em dois modos de ruptura: ruptura por tração do PRFC ou descolamento do PRFC dos lados da viga. Na Figura 2-6 são mostradas vigas que colapsaram por esses dois modos de ruptura.

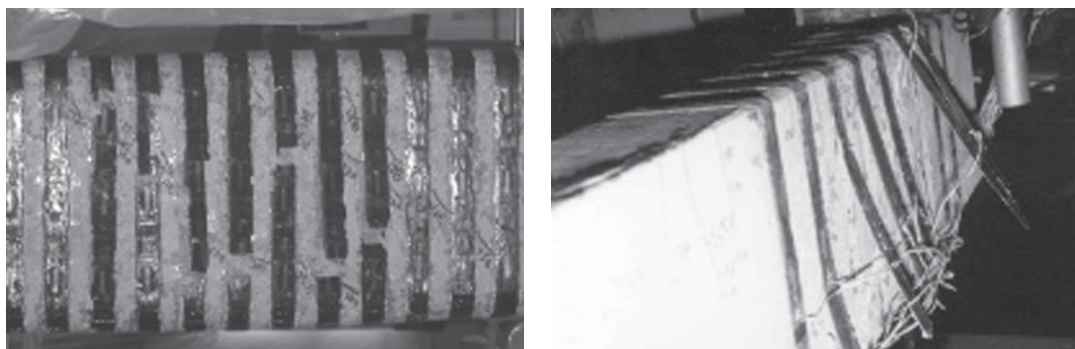


Figura 2-6 – Colapso de vigas por ruptura e por descolamento do PRFC (TENG, 2008).

A ruptura do PRFC se dá devido à deformação excessiva do compósito, que em geral é tracionado pela abertura de uma fissura diagonal de cisalhamento nos lados da viga. A fibra mais tracionada, ao atingir a deformação máxima, se rompe e a ruptura do PRFC se propaga ao longo da fissura de cisalhamento, conduzindo ao colapso da viga. Descolamentos parciais podem ocorrer nesse modo de ruptura, porém o colapso da viga se deve à ruptura do reforço (CHEN & TENG, 2003).

O modo de ruptura devido ao deslocamento da fibra, na verdade, ocorre devido a uma ruptura nas interfaces PRFC-adesivo, adesivo-concreto ou mesmo no próprio concreto ou no próprio adesivo. Segundo CHEN & TENG (2003), são raros os descolamentos puramente localizados nas interfaces PRFC-adesivo, adesivo-concreto e no adesivo. Quase sempre ele ocorre no interior do substrato de concreto, a uma pequena distância da interface adesivo-concreto. É possível ainda que, quando se faz uso de mecanismos de ancoragem, a ruptura ocorra adjacente a eles, como em vigas com reforço em U, onde a ruptura se inicia por uma delaminação na junção entre a alma da viga e a laje.

Por fim, não podemos descartar a possibilidade de ocorrerem modos de ruptura clássicos de vigas não reforçadas. Eles podem ser de cisalhamento, devido a um sistema de reforço ineficiente, ou de flexão. Como já dito anteriormente, é desejável que, caso uma ruptura venha ocorrer em uma estrutura usual, esta venha a ser por flexão. Portanto, ao se reforçar uma viga, a sua capacidade de resistência ao cisalhamento deve, em geral, ser elevada de tal forma que o modo de ruptura a que a viga reforçada passará seja por flexão. Destaca-se que a ancoragem do PRFC tem papel fundamental na transferência de esforços para o reforço.

Os principais modos de ruptura identificados estão resumidos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC coladas externamente.

Rupturas clássicas de flexão e cisalhamento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Deformação plástica excessiva da armadura longitudinal 2. Esmagamento do concreto 3. Ruptura por tração diagonal 4. Esmagamento da diagonal comprimida de concreto
Ruptura no sistema de reforço ao cisalhamento	<ol style="list-style-type: none"> 5. Ruptura do PRFC 6. Descolamento no concreto 7. Descolamento na interface concreto-adesivo 8. Descolamento na interface adesivo-compósito 9. Descolamento no adesivo (falha na coesão da resina) 10. Falha no mecanismo de ancoragem

2.2. MODELOS DE CÁLCULO

Como métodos para o dimensionamento da armadura de cisalhamento das vigas, foram escolhidas as normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2011) e as recomendações de Zsutty (1968). O objetivo é combinar esses métodos com cada um dos métodos de dimensionamento do reforço ao cisalhamento escolhidos: fib – Bulletin 14 (2001), ACI 440.2R-17 (2017) e as recomendações de Chen e Teng.

Os modelos de previsão da resistência ao cisalhamento de uma viga de concreto armado se baseiam na treliça de Mörsch, proposta em torno de 1900 por W. Ritter e E. Mörsch. A teoria associa o mecanismo de uma viga de concreto armado no estágio II (fissurada) com uma treliça, em que as armaduras e o concreto equilibram conjuntamente o esforço cortante. Com correções

adequadas sobre a proposta inicial (CARVALHO, 2015), tem-se hoje a treliça de Mörsch como base de cálculo ao cisalhamento das principais prescrições normativas, como é o caso dos modelos teóricos apresentados em 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3. A Figura 2-7 ilustra a treliça de Mörsch.

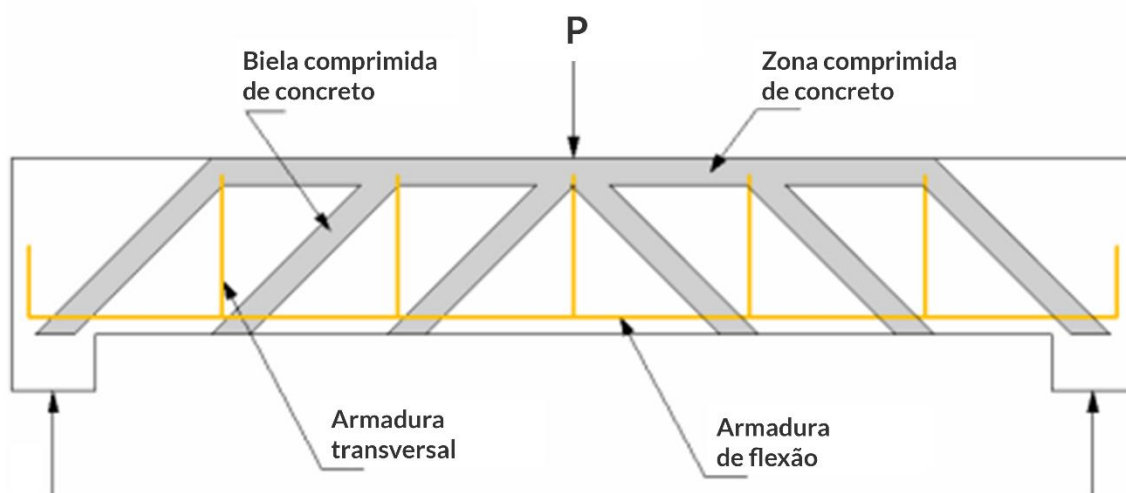


Figura 2-7 – Treliça de Mörsch. (Site AltoQi, 2010)

2.2.1. DISPOSIÇÕES DA ABNT NBR 6118 (2014): PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO (ABNT, 2014)

A ABNT NBR 6118 (2014) em seu item 17.4.1 prescreve que, para elementos lineares admitem-se dois modelos de cálculo que pressupõem a analogia com o modelo em treliça, de banzos paralelos, associado a mecanismos resistentes complementares desenvolvidos no interior do elemento estrutural e traduzidos por uma componente adicional V_c .

O modelo I da norma admite as diagonais de compressão inclinadas a 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, e V_c tem valor constante. Enquanto que o modelo II admite diagonais de compressão inclinadas, variando sua inclinação de 30° a 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, e V_c é reduzida com o aumento de V_{sd} . Nos cálculos realizados nesta pesquisa foi utilizado o modelo I, pois não é escopo deste trabalho investigar a influência da variação da inclinação das diagonais de compressão.

As equações do modelo de cálculo I da norma utilizadas neste trabalho, estão expressas na Tabela 2.3. As equações foram adaptadas de forma a desconsiderar os coeficientes de projeto, levando em consideração as sobrecargas e resistências reais.

Na verificação do estado limite último (ELU), a resistência do elemento estrutural em uma determinada seção transversal é considerada satisfatória quando verificadas, simultaneamente, as condições expressas na Equação 2.1 e Equação 2.2, em que V_{Sd} é a força cortante solicitante na seção, V_{Rd2} é a força cortante resistente, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto, $V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$ é a força cortante resistente, relativa à ruína por tração diagonal, onde V_c é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça e V_{sw} é a parcela resistida pela armadura transversal.

Na demais equações temos que α_{v2} é um coeficiente que depende de f_{ck} , que, por sua vez, é a resistência característica à compressão do concreto, b_w é a largura da alma da viga, d é a sua altura útil, A_{sw} / s é a taxa da armadura transversal, f_{ywk} é a tensão na armadura transversal e α é o ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural. Na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção, caso analisado neste trabalho, $V_c = V_{c0}$.

Tabela 2.3 – Equações utilizadas no cálculo segundo a NBR 6118 (2014).

$V_{Sd} \leq V_{Rd2}$	Equação 2.1
$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$	Equação 2.2
$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{ck} \cdot b_w \cdot d$	Equação 2.3
$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$	Equação 2.4
$V_{c0} = 0,126 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot b_w \cdot d$	Equação 2.5

Tabela 2.3 – Equações utilizadas no cálculo segundo a NBR 6118 (2014).

$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yw} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)$	Equação 2.6
---	-------------

2.2.2. DISPOSIÇÕES DO ACI 318 (2011): REQUERIMENTOS DE NORMA PARA CONCRETO ESTRUTURAL (ACI, 2011)

O ACI 318 (2011) prescreve, em sua seção 11.1.1, que o dimensionamento ao cisalhamento de estruturas de concreto armado deve atender à Equação 2.7, em que V_u é a força cortante solicitante na seção, V_c é a parcela de resistência provida pelo concreto, V_s é a parcela de resistência provida pela armadura transversal e ϕ é um fator de redução da capacidade resistente da viga, adotado normalmente como 0,75. Neste trabalho, porém, considerou-se $\phi = 1$ e levou-se em consideração as solicitações e resistências reais, e não as de projeto.

As equações da norma utilizadas estão dispostas na Tabela 2.4, em que λ é um fator de modificação, considerado como igual a 1 neste trabalho, f'_c é a resistência específica mínima do concreto à compressão, ρ_s é a taxa da área de armadura longitudinal para $b_w \cdot d$, em que b_w é a largura da alma da viga, d é a altura útil dela, $V_{sd} / M_{sd} = 1 / a$, em que a é a distância do ponto de aplicação da carga até o apoio, A_{sw} / s é a taxa da armadura transversal e f_{yw} é a tensão característica de escoamento da armadura transversal.

A Equação 2.8 considera a taxa geométrica de armadura longitudinal levando em conta o efeito pino e a relação a/d . A Equação 2.11 fornece o valor de V_{sw} para estribos perpendiculares ao eixo da peça, assumindo as condições de que todos os estribos que atravessam a fissura ao cisalhamento encontram-se escoando.

Tabela 2.4 – Equações utilizadas no cálculo segundo a ACI 318 (2011).

$V_{sd} \leq \phi \cdot (V_c + V_{sw})$	Equação 2.7
$V_c = \left(0,16 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} + 0,17 \cdot \rho_s \cdot \frac{V_{sd} \cdot d}{M_{sd}} \right) \leq 0,29 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$	Equação 2.8

Tabela 2.4 – Equações utilizadas no cálculo segundo a ACI 318 (2011).

$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d}$	Equação 2.9
$\frac{V_{sd}}{M_{sd}} = \frac{1}{a}$	Equação 2.10
$V_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot d}{s} \leq 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$	Equação 2.11

2.2.3. DISPOSIÇÕES DE ZSUTTY (1968): PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (ZSUTTY, 1968)

Os estudos iniciais do professor Theodore C. Zsutty, membro do American Concret Institute – ACI, resultaram uma publicação no jornal científico do ACI em 1968 sobre um método empírico que combina técnicas de análise dimensional com análise estatística de regressão, aplicada a fontes de dados de vigas de concreto armado ensaiadas para romperem por cisalhamento. Ele avaliou as formulações da norma vigente na época, o ACI 318 (1963), concluindo que elas não eram as representações mais precisas do comportamento de vigas previamente ensaiadas. Zsutty desenvolveu equações empíricas para análise da resistência ao cisalhamento baseada nas propriedades de dimensionamento a/d , f'_c , ρ e f_{yw} . As equações do seu método utilizadas neste trabalho estão dispostas na Tabela 2.5.

Segundo o seu estudo, a resistência ao esforço cortante último das vigas deve atender a Equação 2.12, em que V_{sd} é a força cortante solicitante na seção, V_c é a parcela de resistência provida pelo concreto e V_{sw} é a parcela de resistência provida pela armadura transversal.

A parcela resistida pelo concreto é dada pela Equação 2.13, em que b_w é a largura da alma da viga, d é a altura útil da viga, f'_c é a resistência específica mínima do concreto à compressão, ρ_s é a taxa da área de armadura longitudinal e a é a distância do ponto de aplicação da carga até o apoio. Para as vigas com a relação $a/d < 2,5$, é levado em consideração um fator de modificação que leva em conta o efeito de arco.

A parcela resistida pela armadura transversal é dada pela Equação 2.14, em que A_{sw} / s é a taxa da armadura transversal e f_{yw} é a tensão característica de escoamento da armadura transversal.

Tabela 2.5 – Equações utilizadas no cálculo segundo as prescrições de Zsutty.

$V_{Sd} \leq \phi \cdot (V_c + V_{sw})$	Equação 2.12
$V_c = \begin{cases} 2,3 \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt[3]{f'_c \cdot \rho \cdot \frac{d}{a}} & , \frac{a}{d} \geq 2,5 \\ \left(\frac{2,5}{a/d} \right) \cdot \left(2,3 \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt[3]{f'_c \cdot \rho \cdot \frac{d}{a}} \right) & , \frac{a}{d} < 2,5 \end{cases}$	Equação 2.13
$V_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot d}{s}$	Equação 2.14

2.2.4. DISPOSIÇÕES DO FIB – BULLETIN 14 (2001): REFORÇO DE PRF COLADOS EXTERNAMENTE EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO (FIB, 2001)

O modelo de cálculo disposto no *fib – Bulletin 14* é baseado nos modelos desenvolvidos por alguns pesquisadores, entre os quais Triantafyllou (1998) e Täljsten (1999), os quais propõem que o reforço com PRFC pode ser tratado de forma análoga à armadura transversal, assumindo que no estado limite último de cisalhamento, o PRFC desenvolve uma deformação efetiva na direção principal do reforço que, em geral, é menor que a deformação de tensão de ruptura (SPAGNOLO; et al., 2013). As equações utilizadas estão dispostas na Tabela 2.6.

A capacidade resistente ao cisalhamento de uma viga reforçada, representada por V_{Rd} , é dada, então, pela Equação 2.15, em que V_c é a parcela de resistência provida pelo concreto, V_{sw} é a parcela de resistência provida pela armadura transversal, V_f é a parcela de resistência provida pelo reforço externo e V_{Rd2} é a força cortante resistente relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto. Nas demais equações temos que $\varepsilon_{fd,e}$ é a deformação efetiva de projeto do PRFC, ε_{fe} é a deformação efetiva do PRFC, ε_{fu} é a deformação última do PRFC, E_{fu} é o módulo de elasticidade último do PRFC, que foi tomado como sendo igual a $E_f \cdot b_w$ é a largura da alma da viga, d é a altura da viga, θ é a inclinação da fissura diagonal em relação

ao eixo da viga, α_f é a inclinação da orientação principal da fibra em relação ao eixo da viga, f_{cm} é resistência média à compressão do concreto, ρ_f é a taxa de PRFC, t_f é a espessura da faixa de PRFC, b_f é a sua largura, s_f é o espaçamento entre essas faixas e h_f é a espessura da mesa de vigas T.

É importante destacar que o *fib* limita o valor de ε_{fe} em 0,6%, não podendo ultrapassar esse valor.

Tabela 2.6 – Equações utilizadas no cálculo segundo o *fib – Bulletin 14*.

$V_{Rd} = \min(V_c + V_{sw} + V_f, V_{Rd2})$	Equação 2.15
$V_f = 0,9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$	Equação 2.16
$\varepsilon_{fd,e} = \varepsilon_{fe}$	Equação 2.17
$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} & , \text{ envolvimento completo} \\ \min \begin{bmatrix} 0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \\ 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \end{bmatrix} & , \text{ U ou laterais} \end{cases}$	Equação 2.18
$\rho_f = \left(\frac{2 \cdot t_f}{b_w} \right) \cdot \left(\frac{b_f}{s_f} \right)$	Equação 2.19

2.2.5. DISPOSIÇÕES DO ACI 440.2R (2017): GUIA PARA DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE SISTEMAS DE PRF COLADOS EXTERNAMENTE PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO (ACI, 2017)

As recomendações apresentadas pelo ACI 440.2R (2017), encontram-se baseadas nos princípios tradicionais de projeto de concreto armado dispostos no ACI 318 (2017) e nos conhecimentos do comportamento mecânico do reforço. Essas recomendações baseiam-se no

princípio dos estados limites, definindo-se nível aceitáveis de segurança para a ocorrência do estado limite de utilização, caracterizado pela formação e abertura de fissuras, deformação excessiva e vibrações excessivas, e do estado limite último, caracterizado pela deformação última, ruptura e fadiga.

A resistência ao cisalhamento de uma viga reforçada é dada pela Equação 2.20, onde V_u é a força cortante solicitante na seção, V_{Rd3} é a resistência total ao cisalhamento da viga reforçada, ϕ é um coeficiente de minoração da capacidade resistente para projetos, V_c é a parcela de resistência provida pelo concreto, V_{sw} é a parcela de resistência provida pela armadura transversal, V_f é a parcela de resistência provida pelo reforço, que baseia-se na orientação da fibra e no padrão de fissuração assumido, e ψ_f é um fator de redução de V_f .

Com base nos estudos de confiabilidade de BOUSSELHAM E CHAALLAL (2006), DENIAUD E CHENG (2001), FUNAKAWA, et al. (1997), MATTHYS E TRIANTAFILLOU (2001) e PELLEGRINO e MODENA (2002), o valor do fator de redução ψ_f recomendado para reforço com envolvimento em “U” ou nas laterais é 0,85 e para reforço com envolvimento completo é igual a 0,95.

As equações utilizadas estão dispostas na Tabela 2.7, onde A_{fv} é a área do PRFC no plano transversal à direção principal das fibras, f_{fe} é a tensão efetiva no PRFC, α_f é a inclinação das faixas de PRFC em relação ao eixo longitudinal da viga, d_{fv} é a altura útil do PRFC, s_f é o espaçamento entre as faixas, n é o número de camadas de PRFC coladas, t_f é a espessura da faixa de PRFC, w_f é a sua largura, ε_{fe} é a deformação efetiva da fibra, ε_{fu} é a sua deformação de ruptura, E_f é o módulo de elasticidade da fibra, k_v , k_1 e k_2 são fatores de modificação que dependem principalmente da resistência do concreto, do método de envolvimento da viga com o reforço e do comprimento de ancoragem efetivo L_e . f'_c é resistência específica mínima do concreto à compressão.

É importante destacar que o ACI 440.2R (2017) limita o reforço por meio da Equação 2.29.

Tabela 2.7 – Equações utilizadas no cálculo segundo o ACI 440.2R (2017).

$V_{sd} \leq \phi \cdot V_{Rd3} = \phi \cdot (V_c + V_{sw} + \psi_f \cdot V_f)$	Equação 2.20
$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \alpha) \cdot d_{fv}}{s_f}$	Equação 2.21
$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f$	Equação 2.22
$f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f$	Equação 2.23
$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu} & , \text{ envolvimento completo} \\ k_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004 & , \text{ U ou laterais} \end{cases}$	Equação 2.24
$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11.900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$	Equação 2.25
$L_e = \frac{23.300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}}$	Equação 2.26
$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{\frac{2}{3}}$	Equação 2.27
$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & , \text{ U} \\ \frac{d_{fv} - 2 \cdot L_e}{d_{fv}} & , \text{ laterais} \end{cases}$	Equação 2.28
$V_s + V_f \leq 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$	Equação 2.29

2.2.6. DISPOSIÇÕES SEGUNDO CHEN E TENG (2003): CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM FRP (CHEN & TENG, 2003)

Chen e Teng basearam sua teoria em uma ampla base de dados e tendo em vista as limitações dos métodos de dimensionamento da parcela resistida pelo reforço. Eles propuseram dois modelos de cálculo para estimar essa parcela, onde em um foi prevista a falha por ruptura do reforço e no outro a falha por descolamento do reforço. Esses modelos, bem semelhantes e tratados como um único modelo neste trabalho, tentam suprir as limitações encontradas nos

modelos anteriormente desenvolvidos por CHAALLAL, et al.(1998), TRIANTAFILLOU (1998), TRIANTAFILLOU e ANTONOPOULOS (2000), recomendado pelo CEB – FIB, fib Bulletin 14 (2001), e por KHALIFA, et al. (1998), adotado pelo The Concrete Society. Chen e Teng buscaram também prever uma deformação específica de forma não tão empírica.

A resistência ao cisalhamento de uma viga reforçada é dada pela Equação 2.30, onde V_n é a resistência total ao cisalhamento da viga reforçada, V_c é a parcela de resistência provida pelo concreto, V_{sw} é a parcela de resistência provida pela armadura transversal e V_f é a parcela de resistência provida pelo reforço. Na Figura 2-8 se encontram expressas as principais variáveis do reforço com PRFC, segundo a nomenclatura de Chen e Teng.

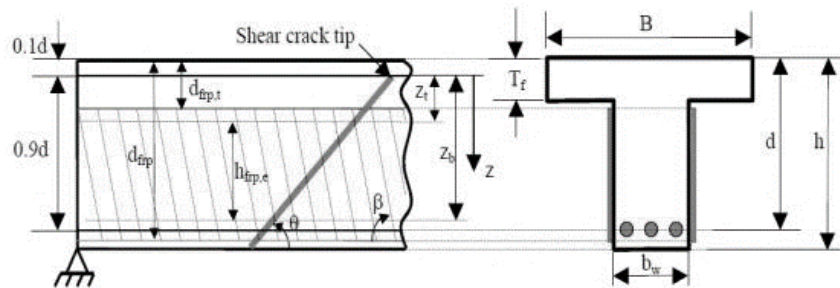


Figura 2-8 – Ilustração das principais variáveis do reforço ao cisalhamento segundo o modelo de CHEN e TENG (2003).

Da análise dos resultados experimentais, Chen e Teng verificaram que existe um comprimento de ancoragem efetivo, e a utilização de uma ancoragem de comprimento superior a este não aumenta a resistência da ligação concreto-reforço. Portanto, essa é a principal diferença entre o reforço com fibra colado externamente e os estribos. Além disso, a máxima tensão no reforço ocorre onde o PRFC possui maior comprimento de ancoragem.

Na Tabela 2.8 estão dispostas as equações utilizadas do modelo de Chen e Teng, onde $f_{fp,ed}$ é a tensão efetiva, ou média, de resistência do PRFC que intercepta a fissura de cisalhamento no estado limite último, que é apenas uma fração da tensão de resistência do PRFC f_{fp} . γ_b é um coeficiente de minoração utilizado para projeto, t_f é a espessura da faixa de PRFC, w_f é a sua largura, $h_{fp,e}$ é a altura efetiva do PRFC, α_f é a inclinação entre a direção principal das fibras do PRFC e o eixo longitudinal da peça, s_f é o espaçamento entre elas, D_{fp} é um fator de

distribuição da tensão no PRFC, quando interceptado pela fissura de cisalhamento, $\sigma_{frp,max}$ é a máxima tensão de projeto no PRFC, β_w é um fator que reflete a largura e espaçamento do PRFC, β_L é um fator que reflete o efeito do comprimento de ancoragem, E_f é o módulo de elasticidade do PRFC, f_c' é a resistência característica à compressão do concreto, ε_{fu} é a de ruptura do PRFC, λ é um fator de modificação que depende de L_{max} e L_e , que são o máximo comprimento de ancoragem e o comprimento de ancoragem efetivo, respectivamente. Tem-se ainda que z_t e z_b são as coordenadas do limite superior e inferior, respectivamente, da altura efetiva do PRFC, d_f' é a distância entre a face de compressão da viga e o limite superior do PRFC, d_f é a distância entre a face de compressão da viga e o limite inferior do PRFC, h é a altura da viga e d é a altura útil da viga.

Tabela 2.8 – Equações utilizadas no cálculo segundo o modelo de Chen e Teng.

$V_n = V_c + V_{sw} + V_f$	Equação 2.30
$V_f = 2 \cdot \frac{f_{frp,ed}}{\gamma_b} \cdot t_f \cdot w_f \cdot \frac{h_{frp,e} \cdot (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f)}{s_f}$	Equação 2.31
$f_{frp,ed} = D_{frp} \cdot \sigma_{frp,max}$	Equação 2.32
$\sigma_{frp,max} = \begin{cases} \min \left[\begin{array}{l} f_{frp} \\ 0,427 \cdot \beta_w \cdot \beta_L \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot \sqrt{f_c'}}{t_f}} \end{array} \right], & \text{FRP debonding} \\ \left. \begin{array}{l} 0,8 \cdot f_{frp} \\ 0,8 \cdot \varepsilon_{fu} \cdot E_f \end{array} \right\} \cdot \frac{f_{frp}}{E_f} \leq \varepsilon_{fu} & \text{FRP rupture} \\ \left. \begin{array}{l} 0,8 \cdot f_{frp} \\ 0,8 \cdot \varepsilon_{fu} \cdot E_f \end{array} \right\} \cdot \frac{f_f}{E_f} > \varepsilon_{fu} \end{cases}$	Equação 2.33
$D_{frp} = \begin{cases} \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}, & \lambda \leq 1 \\ 1 - \left(\frac{\pi - 2}{\pi \cdot \lambda}\right), & \lambda > 1 \end{cases}$	Equação 2.34

Tabela 2.8 – Equações utilizadas no cálculo segundo o modelo de Chen e Teng.

$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_f \cdot \sin \alpha_f}}{1 + \frac{w_f}{s_f \cdot \sin \alpha_f}}}$	Equação 2.35
$\beta_L = \begin{cases} 1 & , \lambda \geq 1 \\ \sin\left(\frac{\pi \cdot \lambda}{2}\right) & , \lambda < 1 \end{cases}$	Equação 2.36
$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e}$	Equação 2.37
$L_{max} = \begin{cases} \frac{h_{fp,e}}{\sin \alpha_f} & , \text{ U} \\ \frac{h_{fp,e}}{2 \cdot \sin \alpha_f} & , \text{ laterais} \end{cases}$	Equação 2.38
$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{\sqrt{f_c'}}$	Equação 2.39
$h_{fp,e} = z_b - z_t$	Equação 2.40
$z_t = d_f'$	Equação 2.41
$z_b = 0,9 \cdot d - (h - d_f)$	Equação 2.42

2.3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de determinar o desempenho das prescrições de cada método para o dimensionamento de vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC, foi montado um banco de dados com resultados experimentais encontrados na literatura. O banco consiste em 137 vigas, provenientes de 14 trabalhos, sendo 7 nacionais e 7 internacionais. Todas essas vigas foram submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos e foram reforçadas ao cisalhamento com PRFC.. Quanto às características gerais das vigas analisadas, é importante destacar o espectro dos principais parâmetros das vidas do banco de dados, tais como o vão das vigas (0,90 m a 4,00 m), a largura (12 cm a 20 cm), a altura (15 cm a 50 cm), a resistência do concreto à compressão

(22,5 MPa a 101,86 MPa), a resistência do aço dos estribos e a presença ou não deles (máximo de 799,2 MPa). Na Figura 2-9 está representada a vista longitudinal de uma dessas vigas. A parte direita da representação mostra o interior da viga juntamente com os estribos, enquanto que a parte esquerda mostra a superfície da viga com o PRFC colado externamente. Na Figura 2-10 está representada a vista da seção transversal interior da viga. A Tabela 2.9 apresenta as principais características das vigas que compõem o banco de dados e a Tabela 2.10 apresenta um resumo das características do reforço.

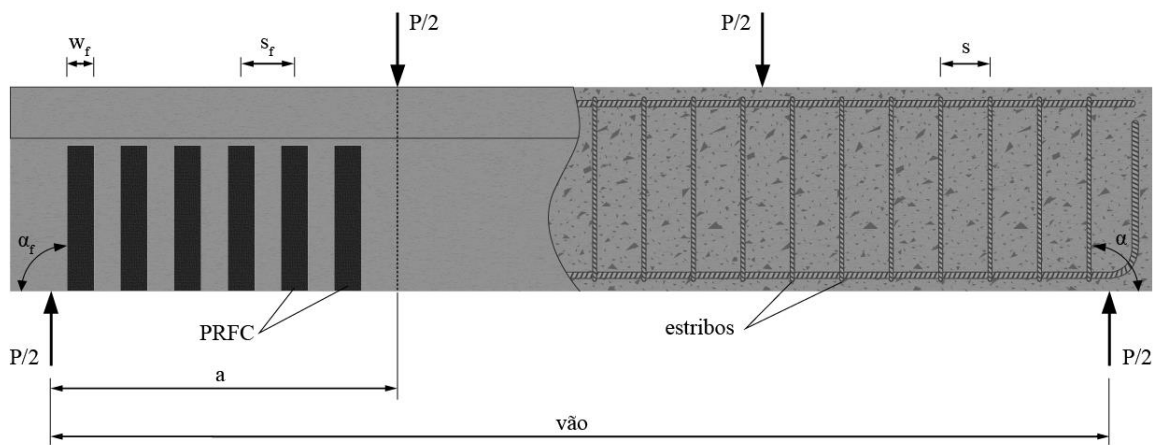


Figura 2-9 – Vista longitudinal da viga.

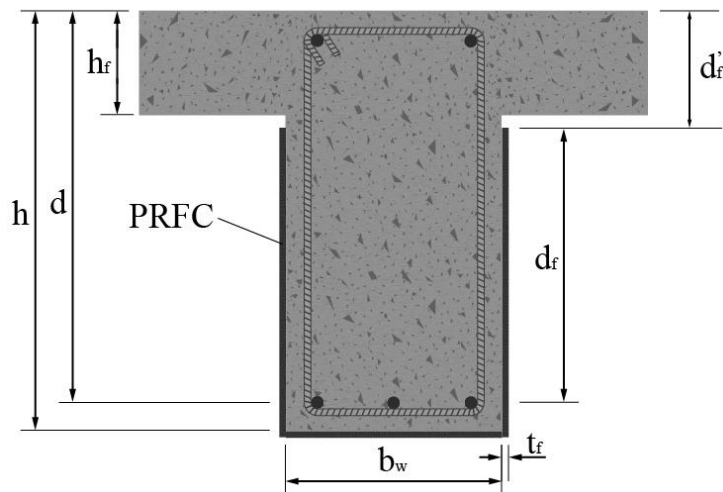


Figura 2-10 – Vista da seção transversal da viga.

Tabela 2.9 – Características gerais das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Características geométricas das vigas							Concreto		Arm. flexão		Arm. Cisalhamento				
		<i>Seção Trans.</i>	<i>b_w</i> (mm)	<i>b_f</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>a/d</i>	<i>vão</i> (mm)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>E_c</i> (MPa)	<i>A_s</i> (cm ²)	ρ_s	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	<i>A_{sw/s}</i> (cm ² /m)	<i>f_{yw}</i> (MPa)	<i>f_u</i> (MPa)
(NETO, 2000)	V1REF	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	44,6	33.472	15,46	0,0290	45,0	90,0	0,00	773	812
	V2	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	44,6	33.472	15,46	0,0290	45,0	90,0	0,00	773	812
	V3	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	44,6	33.472	15,46	0,0290	45,0	90,0	0,00	773	812
	V4REF	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	40,0	31.699	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	773	812
	V5	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	40,0	31.699	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	773	812
	V6	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	40,0	31.699	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	773	812
	V7	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	40,0	31.699	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	773	812
	V8	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	40,0	31.699	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	773	812
(FILHO, 2001)	V1REF	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	41,9	32.443	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
	V2	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	41,9	32.443	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
	V3	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	42,2	32.559	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
	V5	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	45,3	33.733	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
	V6	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	46,4	34.141	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
	V4	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	43,8	33.170	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
	V7	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	45,3	33.733	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
	V8	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	45,3	33.733	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	769	808
(ARAÚJO, 2002)	V1REF	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	23,3	24.193	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	771	771
	V2	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	22,5	23.774	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	771	771
	V3	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	22,5	23.774	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	771	771
	V4	T	150	550	400	355,2	3,01	4000	22,5	23.774	15,46	0,0290	45,0	90,0	1,68	771	771
	V5REF	T	150	550	400	349,3	3,01	4000	46,1	34.030	22,81	0,0435	45,0	90,0	1,68	771	771
	V6	T	150	550	400	349,3	3,01	4000	45,7	33.882	22,81	0,0435	45,0	90,0	1,68	771	771
	V7	T	150	550	400	349,3	3,01	4000	45,8	33.919	22,81	0,0435	45,0	90,0	1,68	771	771
	V8	T	150	550	400	349,3	3,01	4000	46,6	34.214	22,81	0,0435	45,0	90,0	1,68	771	771
(ALTIN; et al., 2010)	V1REF	T	120	360	360	330	5,00	3900	25,0	25.060	9,42	0,0238	45,0	90,0	1,89	275	385,8
	V2	T	120	360	360	330	5,00	3900	25,2	25.160	9,42	0,0238	45,0	90,0	1,89	275	385,8
	V3	T	120	360	360	330	5,00	3900	24,9	25.010	9,42	0,0238	45,0	90,0	1,89	275	385,8
	V4	T	120	360	360	330	5,00	3900	24,8	24.960	9,42	0,0238	45,0	90,0	1,89	275	385,8
	V5	T	120	360	360	330	5,00	3900	24,8	24.960	9,42	0,0238	45,0	90,0	1,89	275	385,8
	V6	T	120	360	360	330	5,00	3900	25,0	25.060	9,42	0,0238	45,0	90,0	1,89	275	385,8
	V7	T	120	360	360	330	5,00	3900	24,9	25.010	9,42	0,0238	45,0	90,0	1,89	275	385,8
	V8	T	120	360	360	330	5,00	3900	25,0	25.060	9,42	0,0238	45,0	90,0	0,00	275	385,8
	V9	T	120	360	360	330	5,00	3900	25,1	25.110	9,42	0,0238	45,0	90,0	0,00	275	385,8

Tabela 2.9 – Características gerais das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Características geométricas das vigas							Concreto		Arm. flexão		Arm. Cisalhamento				
		<i>Seção Trans.</i>	<i>b_w</i> (mm)	<i>b_f</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>a/d</i>	<i>vão</i> (mm)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>E_c</i> (MPa)	<i>A_s</i> (cm ²)	ρ_s	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	<i>A_{sw/s}</i> (cm ² /m)	<i>f_{yw}</i> (MPa)	<i>f_u</i> (MPa)
(ALTIN; et al., 2010)	V10	T	120	360	360	330	5,00	3900	24,6	24.859	9,42	0,0238	45,0	90,0	0,00	275	385,8
(MOFIDI & CHAALLAL, 2011)	S0-0.0R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.12R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.17R1	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.17R2	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.20R1	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.20R2	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.23R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.33R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S0-0.66R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	0,00	540	540
	S1-0.0R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	5,75	540	540
	S1-0.17R1	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	5,75	540	540
	S1-0.17R2	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	5,75	540	540
	S1-0.23R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	5,75	540	540
	S1-0.33R	T	160	508	406	350	3,00	3110	31,0	27.906	19,63	0,0351	45,0	90,0	5,75	540	540
(BEBER, 2003)	V8A REF	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V8B REF	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V9A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V9B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V21A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V10A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V10B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V17A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V11A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V11B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V17B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V12A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V18A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V20A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V12B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V14B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V19A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V19B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747

Tabela 2.9 – Características gerais das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Características geométricas das vigas							Concreto		Arm. flexão		Arm. Cisalhamento				
		<i>Seção Trans.</i>	<i>b_w</i> (mm)	<i>b_f</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>a/d</i>	<i>vão</i> (mm)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>E_c</i> (MPa)	<i>A_s</i> (cm ²)	ρ_s	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	<i>A_{sw/s}</i> (cm ² /m)	<i>f_{yw}</i> (MPa)	<i>f_u</i> (MPa)
(BEBER, 2003)	V13A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V13B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V15B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V16B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V16A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V18B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V14A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V15A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V20B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V22B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V21B	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
	V22A	R	150	150	300	255	2,90	2360	32,8	28.704	12,06	0,0315	45,0	-	0,00	747	747
(GALVEZ, 2003)	VTG1	R	150	150	200	160	3,13	1500	38,0	30.896	3,68	0,0153	45,0	90,0	2,30	773,8	773,8
	V1G1	R	150	150	200	160	3,13	1500	32,1	28.396	3,68	0,0153	45,0	90,0	2,30	773,8	773,8
	V2G1	R	150	150	200	160	3,13	1500	35,3	29.778	3,68	0,0153	45,0	90,0	2,30	773,8	773,8
	VTG2	R	150	150	200	168,7	2,96	1500	85,2	46.263	10,05	0,0397	45,0	90,0	1,85	799,2	799,2
	V1G2	R	150	150	200	168,7	2,96	1500	85,2	46.263	10,05	0,0397	45,0	90,0	1,85	799,2	799,2
	V2G2	R	150	150	200	168,7	2,96	1500	93,2	48.386	10,05	0,0397	45,0	90,0	1,85	799,2	799,2
	V3G2	R	150	150	200	168,7	2,96	1500	101,9	50.584	10,05	0,0397	45,0	90,0	1,85	799,2	799,2
(TÄLJSTEN, 2003)	R1	R	180	180	500	439	2,85	4000	55,9	37.486	16,08	0,0204	45,0	90,0	0,00	500	500
	RC1	R	180	180	500	439	2,85	4000	55,9	37.486	16,08	0,0204	45,0	90,0	0,00	500	500
	C1	R	180	180	500	439	2,85	4000	55,9	37.486	16,08	0,0204	45,0	90,0	0,00	500	500
	C2	R	180	180	500	439	2,85	4000	59,3	38.583	16,08	0,0204	45,0	90,0	0,00	500	500
	C3	R	180	180	500	439	2,85	4000	48,7	34.984	16,08	0,0204	45,0	90,0	0,00	500	500
	C5	R	180	180	500	439	2,85	4000	59,3	38.583	16,08	0,0204	45,0	90,0	0,00	500	500
(KHALIFA, AHMED; et al., 2000)	BT1REF	T	150	380	405	366	2,92	2340	35,0	29.651	12,32	0,0224	45,0	90,0	0,00	350	530
	BT2	T	150	380	405	366	2,92	2340	35,0	29.651	12,32	0,0224	45,0	90,0	0,00	350	530
	BT3	T	150	380	405	366	2,92	2340	35,0	29.651	12,32	0,0224	45,0	90,0	0,00	350	530
	BT4	T	150	380	405	366	2,92	2340	35,0	29.651	12,32	0,0224	45,0	90,0	0,00	350	530
	BT5	T	150	380	405	366	2,92	2340	35,0	29.651	12,32	0,0224	45,0	90,0	0,00	350	530
	BT6	T	150	380	405	366	2,92	2340	35,0	29.651	12,32	0,0224	45,0	90,0	0,00	350	530
		T	150	380	405	366	2,92	2340	35,0	29.651	12,32	0,0224	45,0	90,0	0,00	350	530
(GALLARDO, 2002)	V1REF	T	120	300	460	415,8	4,09	3600	45,3	33.745	12,57	0,0252	45,0	90,0	0,92	681,9	681,9
	V2	T	120	300	460	415,8	4,09	3600	45,8	33.934	12,57	0,0252	45,0	90,0	0,92	681,9	681,9

Tabela 2.9 – Características gerais das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Características geométricas das vigas							Concreto		Arm. flexão		Arm. Cisalhamento				
		<i>Seção Trans.</i>	<i>b_w</i> (mm)	<i>b_f</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>a/d</i>	<i>vão</i> (mm)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>E_c</i> (MPa)	<i>A_s</i> (cm ²)	ρ_s	θ (°)	α (°)	<i>A_{sw/s}</i> (cm ² /m)	<i>f_{yw}</i> (MPa)	<i>f_u</i> (MPa)
(GALLARDO, 2002)	V3	T	120	300	460	415,8	4,09	3600	46,2	34.078	12,57	0,0252	45,0	90,0	0,92	681,9	681,9
	V4	T	120	300	460	415,8	4,09	3600	46,8	34.287	12,57	0,0252	45,0	90,0	0,92	681,9	681,9
	V5	T	120	300	460	415,8	4,09	3600	45,1	33.666	12,57	0,0252	45,0	90,0	0,92	681,9	681,9
	V6	T	120	300	460	415,8	4,09	3600	44,8	33.558	12,57	0,0252	45,0	90,0	0,92	681,9	681,9
(PELLEGRINO & MODENA, 2002)	TR30C1REF	R	150	150	285	250	3,00	2000	27,5	26.283	10,05	0,0268	45,0	90,0	0,00	548	653
	TR30C2	R	150	150	285	250	3,00	2000	27,5	26.283	10,05	0,0268	45,0	90,0	0,00	548	653
	TR30C3	R	150	150	285	250	3,00	2000	27,5	26.283	10,05	0,0268	45,0	90,0	0,00	548	653
	TR30C4	R	150	150	285	250	3,00	2000	27,5	26.283	10,05	0,0268	45,0	90,0	0,00	548	653
	TR30D1REF	R	150	150	285	250	3,00	2000	31,4	28.085	15,71	0,0419	45,0	90,0	5,03	548	653
	TR30D10	R	150	150	285	250	3,00	2000	31,4	28.085	15,71	0,0419	45,0	90,0	5,03	548	653
	TR30D2	R	150	150	285	250	3,00	2000	31,4	28.085	15,71	0,0419	45,0	90,0	5,03	548	653
	TR30D20	R	150	150	285	250	3,00	2000	31,4	28.085	15,71	0,0419	45,0	90,0	5,03	548	653
	TR30D3	R	150	150	285	250	3,00	2000	31,4	28.085	15,71	0,0419	45,0	90,0	5,03	548	653
	TR30D4	R	150	150	285	250	3,00	2000	31,4	28.085	15,71	0,0419	45,0	90,0	5,03	548	653
	TR30D40	R	150	150	285	250	3,00	2000	31,4	28.085	15,71	0,0419	45,0	90,0	5,03	548	653
(SPAGNOLO; et al., 2013)	V1REF	T	150	400	400	360	2,40	2800	48,4	34.883	12,06	0,0223	45,0	90,0	3,93	596	596
	VI-1	T	150	400	400	360	2,40	2800	51,7	36.048	12,06	0,0223	45,0	90,0	3,93	596	596
	VI-2	T	150	400	400	360	2,40	2800	51,7	36.048	12,06	0,0223	45,0	90,0	3,93	596	596
	VI-3	T	150	400	400	360	2,40	2800	52,3	36.246	12,06	0,0223	45,0	90,0	3,93	596	596
	V2REF	T	150	400	400	360	2,40	2800	49,9	35.412	12,06	0,0223	45,0	90,0	1,97	596	596
	VII-1	T	150	400	400	360	2,40	2800	50,9	35.772	12,06	0,0223	45,0	90,0	1,97	596	596
	VII-2	T	150	400	400	360	2,40	2800	51,7	36.048	12,06	0,0223	45,0	90,0	1,97	596	596
	VII-3	T	150	400	400	360	2,40	2800	52,3	36.246	12,06	0,0223	45,0	90,0	1,97	596	596
(BARROS & DIAS, 2003)	VA10	R	150	150	300	265	2,26	1500	49,2	35.156	3,14	0,0079	0,0	0,0	0,00	0	0
	VAM-19	R	150	150	300	265	2,26	1500	49,2	35.156	3,14	0,0079	0,0	0,0	0,00	0	0
	VB10	R	150	150	150	115	2,61	900	56,2	37.573	3,14	0,0182	0,0	0,0	0,00	0	0
	VBM-8	R	150	150	150	115	2,61	900	56,2	37.573	3,14	0,0182	0,0	0,0	0,00	0	0
(CHEN, G.M.; et al., 2016)	S0-CON	T	200	500	400	320	3,00	2670	43,0	32.866	24,63	0,0385	0,0	0,0	0,00	0	0
	S0-U	T	200	500	400	320	3,00	2670	43,0	32.866	24,63	0,0385	0,0	0,0	0,00	0	0
	S0-UFA1	T	200	500	400	320	3,00	2670	43,0	32.866	24,63	0,0385	0,0	0,0	0,00	0	0
	S0-UFA2	T	200	500	400	320	3,00	2670	43,0	32.866	24,63	0,0385	0,0	0,0	0,00	0	0
	S0-UEA1	T	200	500	400	320	3,00	2670	43,0	32.866	24,63	0,0385	0,0	0,0	0,00	0	0
	S0-UEA2	T	200	500	400	320	3,00	2670	43,0	32.866	24,63	0,0385	0,0	0,0	0,00	0	0

Tabela 2.9 – Características gerais das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Características geométricas das vigas							Concreto		Arm. flexão		Arm. Cisalhamento				
		<i>Seção Trans.</i>	<i>b_w</i> (mm)	<i>b_f</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>a/d</i>	<i>vão</i> (mm)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>E_c</i> (MPa)	<i>A_s</i> (cm ²)	<i>ρ_s</i>	<i>θ</i> (°)	<i>α</i> (°)	<i>A_{sw}/s</i> (cm ² /m)	<i>f_{yw}</i> (MPa)	<i>f_u</i> (MPa)
(CHEN, G.M.; et al., 2016)	S8-CON	T	200	500	400	320	3,00	2670	46,1	34.030	24,63	0,0385	45,0	90,0	2,61	416	416
	S8-U	T	200	500	400	320	3,00	2670	46,1	34.030	24,63	0,0385	45,0	90,0	2,61	416	416
	S8-UFA1	T	200	500	400	320	3,00	2670	46,1	34.030	24,63	0,0385	45,0	90,0	2,61	416	416
	S8-UFA2	T	200	500	400	320	3,00	2670	46,1	34.030	24,63	0,0385	45,0	90,0	2,61	416	416
	S8-UEA1	T	200	500	400	320	3,00	2670	46,1	34.030	24,63	0,0385	45,0	90,0	2,61	416	416

Tabela 2.10 – Características do reforço das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Reforço												Resultados Experimentais		
		<i>E_f</i> (MPa)	<i>n</i>	<i>t_f</i> (mm)	<i>w_f</i> (mm)	<i>s_f</i> (mm)	<i>α_f</i> (°)	<i>ε_{fu}</i>	<i>ρ_f</i>	<i>d_f</i> (mm)	<i>d_f'</i> (mm)	<i>Mét. Ref.</i>	<i>Ancoragem</i>	<i>Viga de Ref.</i>	<i>MR</i>	<i>V_{u,exp}</i> (kN)
(NETO, 2000)	V1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	251,0
	V2	228.000	1	0,165	150	230	90	0,017	0,143%	255,2	100,0	U	-	-	D	275,6
	V3	228.000	1	0,165	150	230	45	0,017	0,143%	255,2	100,0	U	-	-	D	320,5
	V4REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	368,4
	V5	228.000	1	0,165	150	230	90	0,017	0,143%	255,2	100,0	U	-	-	D	403,0
	V6	228.000	2	0,165	150	200	90	0,017	0,165%	255,2	100,0	U	-	-	D	402,8
	V7	228.000	1	0,165	150	230	45	0,017	0,143%	255,2	100,0	U	-	-	D	420,6
	V8	228.000	1	0,165	150	180	45	0,017	0,183%	255,2	100,0	U	-	-	D	395,3
(FILHO, 2001)	V1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	360,0
	V2	228.000	1	0,165	150	230	90	0,017	0,143%	355,2	0,0	C	SIM	-	F	589,0
	V3	228.000	2	0,165	150	200	90	0,017	0,165%	355,2	0,0	C	SIM	-	F	570,0
	V5	228.000	1	0,165	150	200	45	0,017	0,165%	355,2	0,0	C	SIM	-	F	579,0
	V6	228.000	1	0,165	150	230	45	0,017	0,143%	355,2	0,0	C	SIM	-	F	573,0
	V4	228.000	3	0,165	150	200	90	0,017	0,165%	255,2	100,0	U	SIM	-	D	420,0
	V7	228.000	1	0,165	150	230	90	0,017	0,143%	255,2	100,0	U	SIM	-	D	491,0
	V8	228.000	2	0,165	150	200	90	0,017	0,165%	255,2	100,0	U	SIM	-	D	510,0
(ARAÚJO, 2002)	V1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	260,0
	V2	228.000	1	0,165	150	230	90	0,017	0,143%	255,2	100,0	U	-	-	D	295,0
	V3	228.000	1	0,165	150	230	90	0,017	0,143%	255,2	100,0	U	-	-	D	315,0
	V4	228.000	2	0,165	150	200	90	0,017	0,165%	255,2	100,0	U	-	-	D	300,0
	V5REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	372,0
	V6	228.000	1	0,165	150	230	90	0,017	0,143%	349,3	0,0	C	SIM	-	R	650,0
	V7	228.000	2	0,165	150	200	90	0,017	0,165%	349,3	0,0	C	SIM	-	R	788,0
	V8	228.000	1	0,165	150	325	45	0,017	0,102%	349,3	0,0	C	SIM	-	R	612,0
(ALTIN; et al., 2010)	V1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	99,0
	V2	231.000	1	0,12	50	125	90	0,017	0,080%	255,0	75,0	U	-	-	D	165,1
	V3	231.000	1	0,12	50	150	90	0,017	0,067%	255,0	75,0	U	-	-	D	164,0
	V4	231.000	1	0,12	50	200	90	0,017	0,050%	255,0	75,0	U	-	-	D	138,1
	V5	231.000	1	0,12	50	125	90	0,017	0,080%	255,0	75,0	U	SIM	-	F	175,4
	V6	231.000	1	0,12	50	150	90	0,017	0,067%	255,0	75,0	U	SIM	-	F	172,6
	V7	231.000	1	0,12	50	200	90	0,017	0,050%	255,0	75,0	U	SIM	-	F	171,3
	V8	231.000	1	0,12	50	125	90	0,017	0,080%	255,0	75,0	U	SIM	-	F	172,7

Tabela 2.10 – Características do reforço das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Reforço												Resultados Experimentais		
		<i>E_f</i> (MPa)	<i>n</i>	<i>t_f</i> (mm)	<i>w_f</i> (mm)	<i>s_f</i> (mm)	<i>α_f</i> (°)	<i>ε_{fu}</i>	<i>ρ_f</i>	<i>d_f</i> (mm)	<i>d_f'</i> (mm)	<i>Mét. Ref.</i>	<i>Ancoragem</i>	<i>Viga de Ref.</i>	<i>MR</i>	<i>V_{u,exp}</i> (kN)
(ALTIN; et al., 2010)	V9	231.000	1	0,12	50	150	90	0,017	0,067%	255,0	75,0	U	SIM	-	F	170,4
	V10	231.000	1	0,12	50	200	90	0,017	0,050%	255,0	75,0	U	SIM	-	F	170,0
(MOFIDI & CHAALLAL, 2011)	S0-0.0R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	122,7
	S0-0.12R	230.000	1	0,11	40	115	90	0,015	0,048%	248,0	102,0	U	-	-	R	182,6
	S0-0.17R1	230.000	1	0,11	87,5	175	90	0,015	0,069%	248,0	102,0	U	-	-	D	203,1
	S0-0.17R2	230.000	1	0,11	1000	1000	90	0,015	0,138%	248,0	102,0	U	-	-	D	154,7
	S0-0.20R1	230.000	1	0,11	53	87,5	90	0,015	0,083%	248,0	102,0	U	-	-	R	201,9
	S0-0.20R2	230.000	1	0,11	30	50	90	0,015	0,083%	248,0	102,0	U	-	-	R	197,9
	S0-0.23R	230.000	1	0,11	87,5	125	90	0,015	0,096%	248,0	102,0	U	-	-	R	227,3
	S0-0.33R	230.000	1	0,11	1000	1000	90	0,015	0,138%	248,0	102,0	U	-	-	D	181,2
	S0-0.66R	230.000	1	0,11	1000	1000	90	0,015	0,138%	248,0	102,0	U	-	-	D	183,8
	S1-0.0R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	350,6
	S1-0.17R1	230.000	1	0,11	87,5	175	90	0,015	0,069%	248,0	102,0	U	-	-	D	365,9
	S1-0.17R2	230.000	1	0,11	87,5	175	90	0,015	0,069%	248,0	102,0	U	-	-	D	372,5
	S1-0.23R	230.000	1	0,11	87,5	125	90	0,015	0,096%	248,0	102,0	U	-	-	D	383,4
	S1-0.33R	230.000	1	0,11	1000	1000	90	0,015	0,138%	248,0	102,0	U	-	-	D	378,3
(BEBER, 2003)	V8A REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	114,7
	V8B REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	113,0
	V9A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	LL	-	-	D	196,2
	V9B	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	LL	-	-	D	208,6
	V21A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	LL	-	-	D	230,4
	V10A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	L	-	-	D + R	215,0
	V10B	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	L	-	-	D + R	212,0
	V17A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	L	-	-	D + R	205,6
	V11A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	U	-	-	D + R	196,9
	V11B	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	U	-	-	D + R	249,6
	V17B	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	U	-	-	D + R	185,9
	V12A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	C	SIM	-	R	232,7
	V18A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	C	SIM	-	R	254,6
	V20A	230.000	1	0,11	50	100	90	0,015	0,073%	255,0	0,0	C	SIM	-	R	280,2
	V12B	230.000	1	0,11	50	141,4	45	0,015	0,052%	255,0	0,0	LL	-	-	D	203,3
	V14B	230.000	1	0,11	50	141,4	45	0,015	0,052%	255,0	0,0	LL	-	-	D	183,3

Tabela 2.10 – Características do reforço das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Reforço												Resultados Experimentais		
		E_f (MPa)	n	t_f (mm)	w_f (mm)	s_f (mm)	α_f (°)	ε_{fu}	ρ_f	d_f (mm)	d_f' (mm)	<i>Mét. Ref.</i>	<i>Ancoragem</i>	<i>Viga de Ref.</i>	<i>MR</i>	$V_{u,exp}$ (kN)
(BEBER, 2003)	V19A	230.000	1	0,11	50	141,4	45	0,015	0,052%	255,0	0,0	L	-	-	D + R	236,8
	V19B	230.000	1	0,11	50	141,4	45	0,015	0,052%	255,0	0,0	L	-	-	D + R	230,3
	V13A	230.000	1	0,11	655	655	90	0,015	0,147%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	244,0
	V13B	230.000	1	0,11	655	655	90	0,015	0,147%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	251,5
	V15B	230.000	1	0,11	655	655	90	0,015	0,147%	255,0	0,0	U	-	-	D + AC	276,7
	V16B	230.000	1	0,11	655	655	90	0,015	0,147%	255,0	0,0	U	-	-	D + AC	244,9
	V16A	230.000	1	0,11	655	655	90	0,015	0,147%	255,0	0,0	C	SIM	-	F	367,9
	V18B	230.000	1	0,11	655	655	90	0,015	0,147%	255,0	0,0	C	SIM	-	F	404,8
	V14A	230.000	1	0,11	655	655	45	0,015	0,147%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	256,8
	V15A	230.000	1	0,11	655	655	45	0,015	0,147%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	241,1
	V20B	205.000	1	1,4	50	100	90	0,012	0,933%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	285,8
	V22B	205.000	1	1,4	50	100	90	0,012	0,933%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	225,0
	V21B	205.000	1	1,4	50	141,4	45	0,012	0,660%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	271,4
	V22A	205.000	1	1,4	50	141,4	45	0,012	0,660%	255,0	0,0	LL	-	-	D + AC	251,2
(GALVEZ, 2003)	VTG1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	95,0
	V1G1	240.000	1	0,117	500	500	90	0,016	0,156%	160,0	0,0	LL	-	-	F	134,0
	V2G1	240.000	1	0,117	500	500	45	0,016	0,156%	160,0	0,0	LL	-	-	F	145,0
	VTG2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	150,0
	V1G2	240.000	1	0,117	750	750	90	0,016	0,156%	168,7	0,0	LL	-	-	F	241,0
	V2G2	240.000	1	0,117	50	150	90	0,016	0,052%	168,7	0,0	U	-	-	D	175,0
	V3G2	240.000	1	0,117	50	150	90	0,016	0,052%	168,7	0,0	C	SIM	-	D	232,0
(TÄLJSTEN, 2003)	R1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	248,1
	RC1	234.000	1	0,11	2000	2000	45	0,019	0,122%	439,0	0,0	LL	-	-	TD	612,1
	C1	234.000	1	0,07	2000	2000	45	0,019	0,078%	439,0	0,0	LL	-	-	R	493,3
	C2	234.000	1	0,11	2000	2000	45	0,019	0,122%	439,0	0,0	LL	-	-	TD	514,4
	C3	234.000	1	0,11	2000	2000	90	0,019	0,122%	439,0	0,0	LL	-	-	TD	521,2
	C5	234.000	1	0,165	2000	2000	45	0,019	0,183%	439,0	0,0	LL	-	-	TD	668,6
(KHALIFA, AHMED; et al., 2000)	BT1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	180,0
	BT2	228.000	1	0,165	1070	1070	90	0,017	0,220%	266,0	100,0	U	-	-	D	310,0
	BT3	228.000	1	0,165	1070	1070	90	0,017	0,220%	266,0	100,0	U	-	-	D	315,0
	BT4	228.000	1	0,165	50	125	90	0,017	0,088%	266,0	100,0	U	-	-	D	324,0
	BT5	228.000	1	0,165	50	125	90	0,017	0,088%	266,0	100,0	LL	-	-	D	243,0

Tabela 2.10 – Características do reforço das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Reforço												Resultados Experimentais		
		<i>E_f</i> (MPa)	<i>n</i>	<i>t_f</i> (mm)	<i>w_f</i> (mm)	<i>s_f</i> (mm)	<i>a_f</i> (°)	<i>ε_{fu}</i>	<i>ρ_f</i>	<i>d_f</i> (mm)	<i>d_f'</i> (mm)	<i>Mét. Ref.</i>	<i>Ancoragem</i>	<i>Viga de Ref.</i>	<i>MR</i>	<i>V_{u,exp}</i> (kN)
(KHALIFA, AHMED; et al., 2000)	BT6	228.000	1	0,165	1070	1070	90	0,017	0,220%	266,0	100,0	U	SIM	-	F	442,0
(GALLARDO, 2002)	V1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	234,1
	V2	288.000	1	0,117	50	150	90	0,008	0,065%	315,8	100,0	LL	-	-	D	212,5
	V3	288.000	1	0,117	50	150	90	0,008	0,065%	315,8	100,0	LL	-	-	D	257,2
	V4	288.000	1	0,117	50	150	90	0,008	0,065%	315,8	100,0	U	-	-	D	277,0
	V5	288.000	2	0,117	50	150	90	0,008	0,065%	315,8	100,0	U	SIM	-	D	323,0
	V6	288.000	2	0,117	50	150	90	0,008	0,065%	315,8	100,0	U	SIM	-	D	298,5
(PELLEGRINO & MODENA, 2002)	TR30C1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	149,4
	TR30C2	233.600	1	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	R	240,0
	TR30C3	233.600	3	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	R	225,6
	TR30C4	233.600	3	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	R	280,4
	TR30D1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	323,0
	TR30D10	233.600	2	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	D	386,0
	TR30D2	233.600	3	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	D	246,6
	TR30D20	233.600	3	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	D	495,0
	TR30D3	233.600	1	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	D	322,8
	TR30D4	233.600	2	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	D	417,6
	TR30D40	233.600	2	0,165	750	750	90	0,015	0,220%	250,0	0,0	LL	-	-	D	424,0
(SPAGNOLO; et al., 2013)	V1REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	407,2
	VI-1	255.000	1	0,122	100	225	90	0,116	0,072%	280,0	80,0	U	SIM	-	TD + D	552,8
	VI-2	255.000	2	0,122	100	225	90	0,116	0,072%	280,0	80,0	U	SIM	-	TD + D	586,7
	VI-3	255.000	3	0,122	100	225	90	0,116	0,072%	280,0	80,0	U	SIM	-	TD + D	590,1
	V2REF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	302,5
	VII-1	255.000	1	0,122	100	225	90	0,116	0,072%	280,0	80,0	U	SIM	-	TD + D	433,3
	VII-2	255.000	2	0,122	100	225	90	0,116	0,072%	280,0	80,0	U	SIM	-	TD + D	466,6
	VII-3	255.000	3	0,122	100	225	90	0,116	0,072%	280,0	80,0	U	SIM	-	TD + D	416,3
(BARROS & DIAS, 2003)	VA10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	100,4
	VAM-19	390.000	1	0,167	25	80	90	0,008	0,070%	300,0	0,0	C	SIM	-	TD + D	122,1
	VB10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	TD	74,0
	VBM-8	390.000	1	0,167	25	190	90	0,008	0,029%	150,0	0,0	C	SIM	-	TD + R	111,1

Tabela 2.10 – Características do reforço das vigas analisadas.

<i>Autor</i>	<i>Espécime</i>	Reforço												Resultados Experimentais		
		E_f (MPa)	n	t_f (mm)	w_f (mm)	s_f (mm)	α_f (°)	ε_{fu}	ρ_f	d_f (mm)	d_f' (mm)	<i>Mét. Ref.</i>	<i>Ancoragem</i>	<i>Viga de Ref.</i>	<i>MR</i>	$V_{u,exp}$ (kN)
(CHEN, G.M.; et al., 2016)	S0-CON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	S	184,0
	S0-U	226.000	1	0,167	50	100	90	0,007	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + S	223,7
	S0-UFA1	226.000	1	0,167	50	100	90	0,009	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + AN	233,9
	S0-UFA2	226.000	1	0,167	50	100	90	0,012	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + F + AN	313,5
	S0-UEA1	226.000	1	0,167	50	100	90	0,010	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + F + AN	326,7
	S0-UEA2	226.000	1	0,167	50	100	90	0,015	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + F	354,5
	S8-CON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SIM	S	271,1
	S8-U	226.000	1	0,167	50	100	90	0,006	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + S	300,8
	S8-UFA1	226.000	1	0,167	50	100	90	0,009	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + AN	321,0
	S8-UFA2	226.000	1	0,167	50	100	90	0,009	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + F + AN	366,3
	S8-UEA1	226.000	1	0,167	50	100	90	0,009	0,084%	400,0	100,0	U	SIM	-	D + S	361,9

Nota 1: a coluna *MR* indica o modo de ruptura sofrido pela viga, sendo D = descolamento do reforço, TD = tração diagonal, R = ruptura do reforço, F = flexão, AC = arrancamento do cobrimento, AN = falha na ancoragem, S = cisalhamento.

Nota 2: a coluna Método de Reforço (*Mét. Ref.*) indica o envolvimento do reforço na viga, sendo C = envolvimento completo, U = envolvimento em “U”, L = envolvimento em “L”, LL = colagem apenas nas laterais.

3. METODOLOGIA

Como visto anteriormente, os modelos de cálculo assumem que a resistência total de uma viga reforçada é dada, em geral, pela soma das parcelas de resistência providas pelo concreto, pela armadura transversal e pelo reforço, como expresso pela Equação 3.1. Os três modelos de cálculo expostos em 2.2. para o dimensionamento da armadura de cisalhamento, foram utilizados para calcular a parcela $V_c + V_{sw}$, enquanto que os três modelos de cálculo do reforço foram utilizados para o cálculo de V_f .

$$V_n = V_c + V_{sw} + V_f \quad \text{Equação 3.1}$$

Foi realizada a combinação de cada um dos três modelos usados para o dimensionamento de vigas ao cisalhamento com cada um dos três modelos de cálculo do reforço, resultando, portanto, em 9 combinações que resultaram em diferentes valores da resistência total prevista de vigas reforçadas.

Para determinar as combinações que melhor representam os resultados experimentais, foi realizada uma análise estatística. Fundamentalmente, foi feita a análise da relação entre a capacidade resistente teórica com a capacidade resistente experimental: V_{exp} / V_{teo} . As combinações que melhor aproximam essa razão com a unidade, melhor representam os resultados experimentais.

Outra análise realizada foi o critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013), o *Demerit Points Classification – DPC*, por meio do qual a relação V_{exp} / V_{teo} de cada viga é classificada em faixas que vão de “extremamente perigoso” a “extremamente conservador”, além disso, cada uma dessas faixas possuem um escore de penalidade. A penalidade total do modelo de cálculo analisado é definido, então, pela soma do produto entre a relação V_{exp} / V_{teo} e o escore de classificação da viga. Uma penalidade maior significa não apenas que o método é perigoso, mas pode significar também que há muito conservadorismo, e pouca aproximação com a situação real observada. Na Tabela 3.1 estão expostas as faixas e escores correspondentes do DPC.

Tabela 3.1 – Critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013) – *Demerit Point Classification – DPC*.

V_{exp} / V_{teo}	Classificação	Escore de penalidade
$V_{exp}/V_{teo} < 0,50$	Extremamente Perigoso	10
$0,50 \leq V_{exp}/V_{teo} < 0,65$	Perigoso	5
$0,65 \leq V_{exp}/V_{teo} < 0,85$	Baixa Segurança	2
$0,85 \leq V_{exp}/V_{teo} < 1,30$	Segurança Adequada	0
$1,30 \leq V_{exp}/V_{teo} < 2,00$	Conservador	1
$2,00 \leq V_{exp}/V_{teo}$	Extremamente Conservador	2

Foi, por fim, realizada uma análise paramétrica afim de avaliar o comportamento dos parâmetros que influenciam a resistência de uma viga à ruptura por cisalhamento. Para isso, foram selecionados alguns dos parâmetros dispostos em 2.1.2, os quais foram analisados em função da relação V_{exp} / V_{teo} .

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Como já dito, foram analisados 14 trabalhos contendo vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC, mas com diferentes métodos de colagem do reforço. O gráfico da Figura 4-1 nos mostra os métodos de colagem que compõem cada um dos trabalhos, bem como a resistência média experimental das vigas de cada método e trabalho.

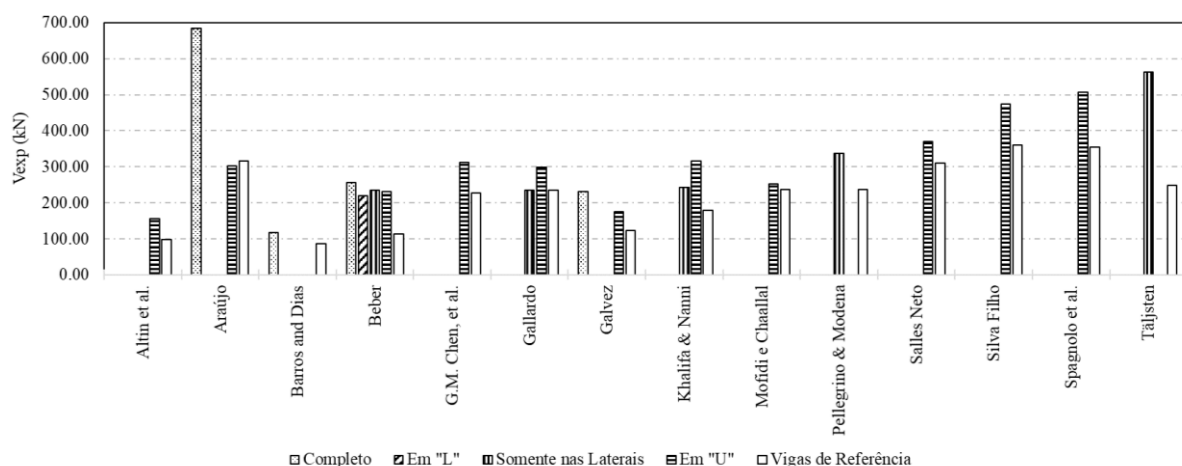


Figura 4-1 – Carga Experimental de Ruptura x Método de Colagem do PRFC.

4.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste capítulo parâmetros estatísticos foram utilizados e cabe aqui a definição de alguns deles.

O desvio padrão (DP) é uma medida de dispersão de valores em torno da média. Em outras palavras, um maior desvio padrão indica maior dispersão dos valores de um conjunto em relação à média. Matematicamente, o desvio padrão de uma variável aleatória discreta, como é o caso analisado nesta pesquisa, é expresso conforme Equação 4.1, em que σ é o desvio padrão, N é o número de elementos do conjunto, x_i é o elemento i do conjunto e μ é a média.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad \text{Equação 4.1}$$

Um outro parâmetro de dispersão é o coeficiente de variação (CV). Ele expressa a extensão da variabilidade dos valores em relação à média. Comparando conjuntos de mesma quantidade de elementos, como é o caso neste trabalho, um maior coeficiente de variação indica maior extensão da variabilidade e, portanto, maior dispersão em relação à média. O CV é definido como o desvio padrão sobre a média, conforme Equação 4.2.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{Equação 4.2}$$

Por fim, o coeficiente de determinação (R^2) utilizado em alguns gráficos deste trabalho é um parâmetro que expressa o ajustamento de uma linearização em relação aos elementos do intervalo. É um parâmetro que varia de 0 a 1 e indica o quanto o modelo linearizado representa os valores observados. Ou seja, quanto maior R^2 , maior é a representatividade do modelo e mais ajustado ele está à amostra analisada.

Os resultados da análise estatística das combinações realizadas estão expostos na Tabela 4.1, onde estão dispostos a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a porcentagem de resultados contra a segurança – que possuem relação V_{exp}/V_{teo} menor que a unidade.

Tabela 4.1 – Análise estatística das vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC.

Cálculo de V_c e V_{sw}	Cálculo de V_{prfc}	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Resultados Contra a Segurança
NBR 6118	ACI 440	1.13	0.28	24.8%	37.8%
	FIB	1.01	0.23	22.4%	55.1%
	Chen & Teng	1.17	0.23	19.3%	24.5%
ACI 318	ACI 440	1.23	0.32	26.1%	25.5%
	FIB	1.09	0.25	23.3%	39.8%
	Chen & Teng	1.28	0.25	19.7%	14.3%
Zsutty	ACI 440	1.02	0.24	23.1%	53.1%
	FIB	0.92	0.20	21.5%	63.3%
	Chen & Teng	1.06	0.21	19.5%	37.8%

A tabela nos mostra que a combinação ACI 318-Chen & Teng possui a maior média e a menor quantidade de resultados contra a segurança, entretanto, nota-se que ela apresenta um desvio

padrão mais elevado que outras cinco combinações e, além disso, aparente ter um conservadorismo em nível excessivo.

O menor desvio padrão foi verificado na combinação Zsutty-FIB, no entanto, a quantidade de resultados contra a segurança foi a mais alta, alcançando quase 50% de todas as vigas analisadas. Verifica-se que combinando Zsutty com Chen & Teng o desvio padrão ainda se mantém, relativamente, baixo, mas neste caso uma redução nos resultados contra a segurança.

Analisando os resultados das combinações da NBR 6118, verifica-se que os melhores resultados foram obtidos a partir da combinação com Chen & Teng, verificando-se, para este caso, uma média acima da unidade, mas não tão conservadora quando aquela resultante da combinação com o ACI 318, e o segundo mais baixo desvio padrão, além de uma quantidade, relativamente, pequena de resultados contra a segurança.

Na Figura 4-2 estão distribuídos os resultados de cada viga, considerando cada combinação de cálculo, separados por modelo de cálculo do cisalhamento. Verifica-se nos três gráficos que as combinações que melhor favorecem a segurança se dão por meio da combinação dos modelos de cálculo do cisalhamento com Chen & Teng, que ainda apresenta nos três gráficos o melhor ajustamento à tendência linear, o que é observado pelo valor de R^2 mais próximo da unidade. Isso significa uma menor dispersão dos resultados em torno da regressão linear.

NBR 6118

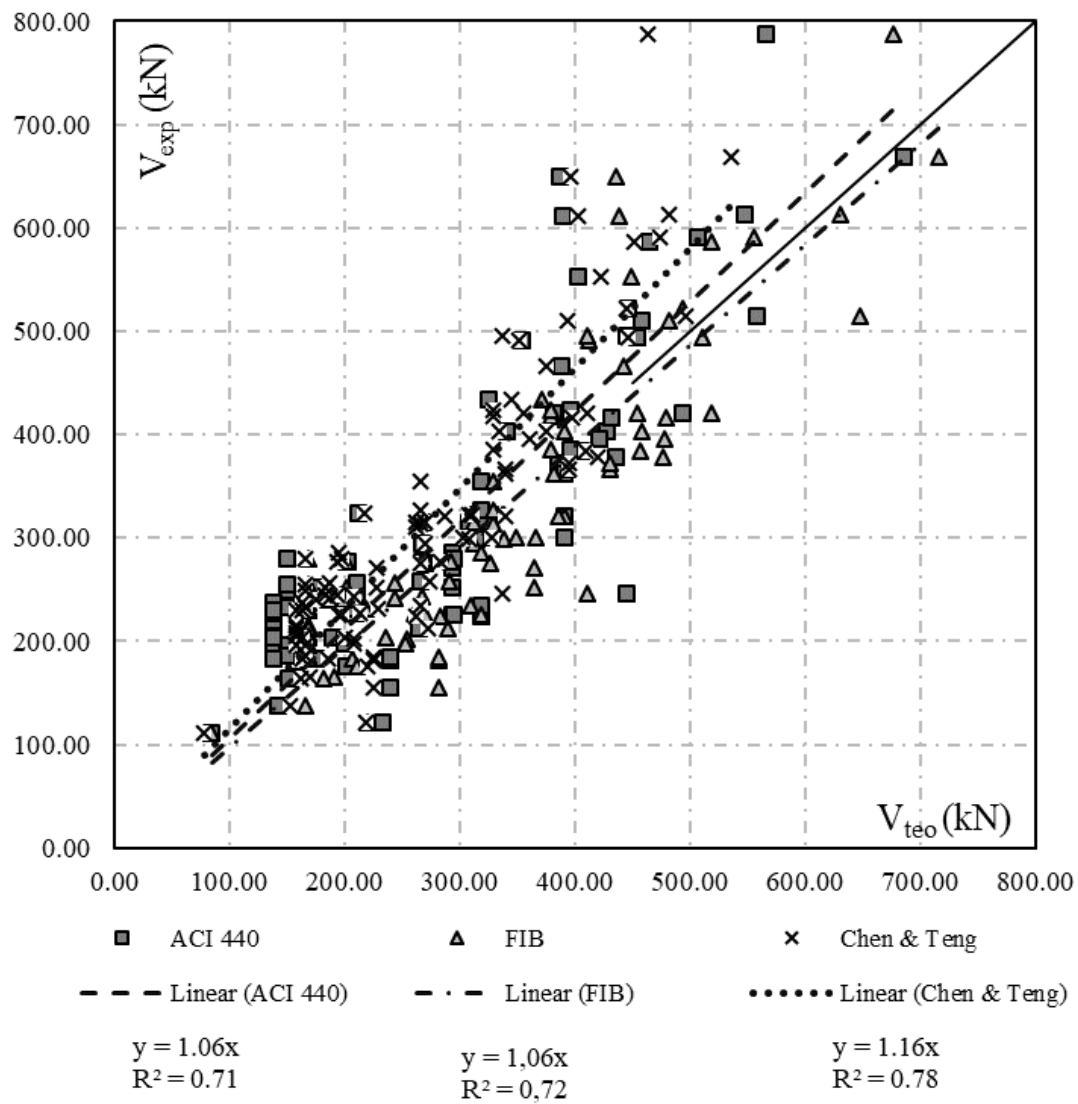


Figura 4-2a – Distribuição de resultados das combinações a partir da NBR 6118.

ACI 318

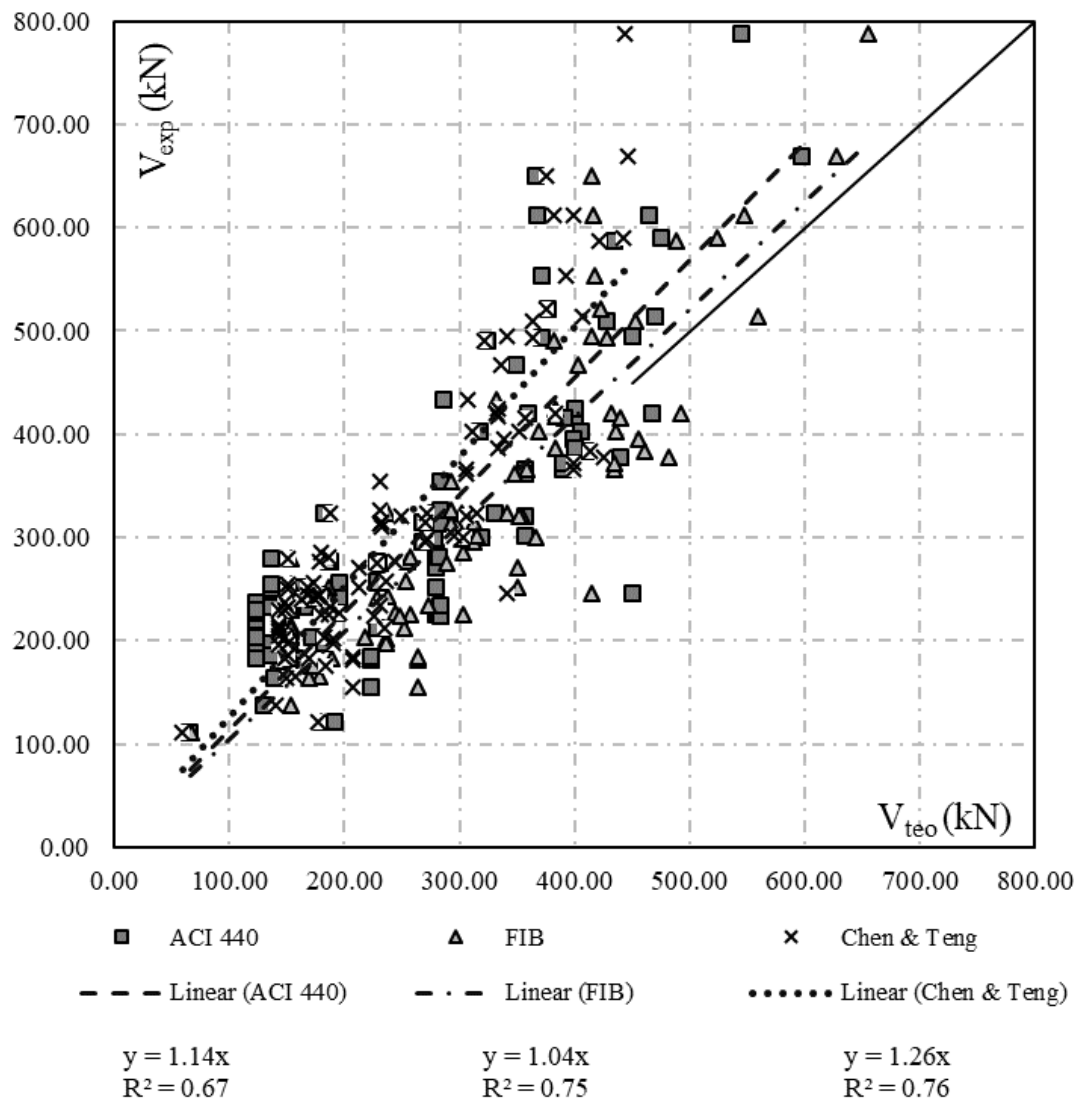


Figura 4-2b – Distribuição de resultados das combinações a partir do ACI 318.

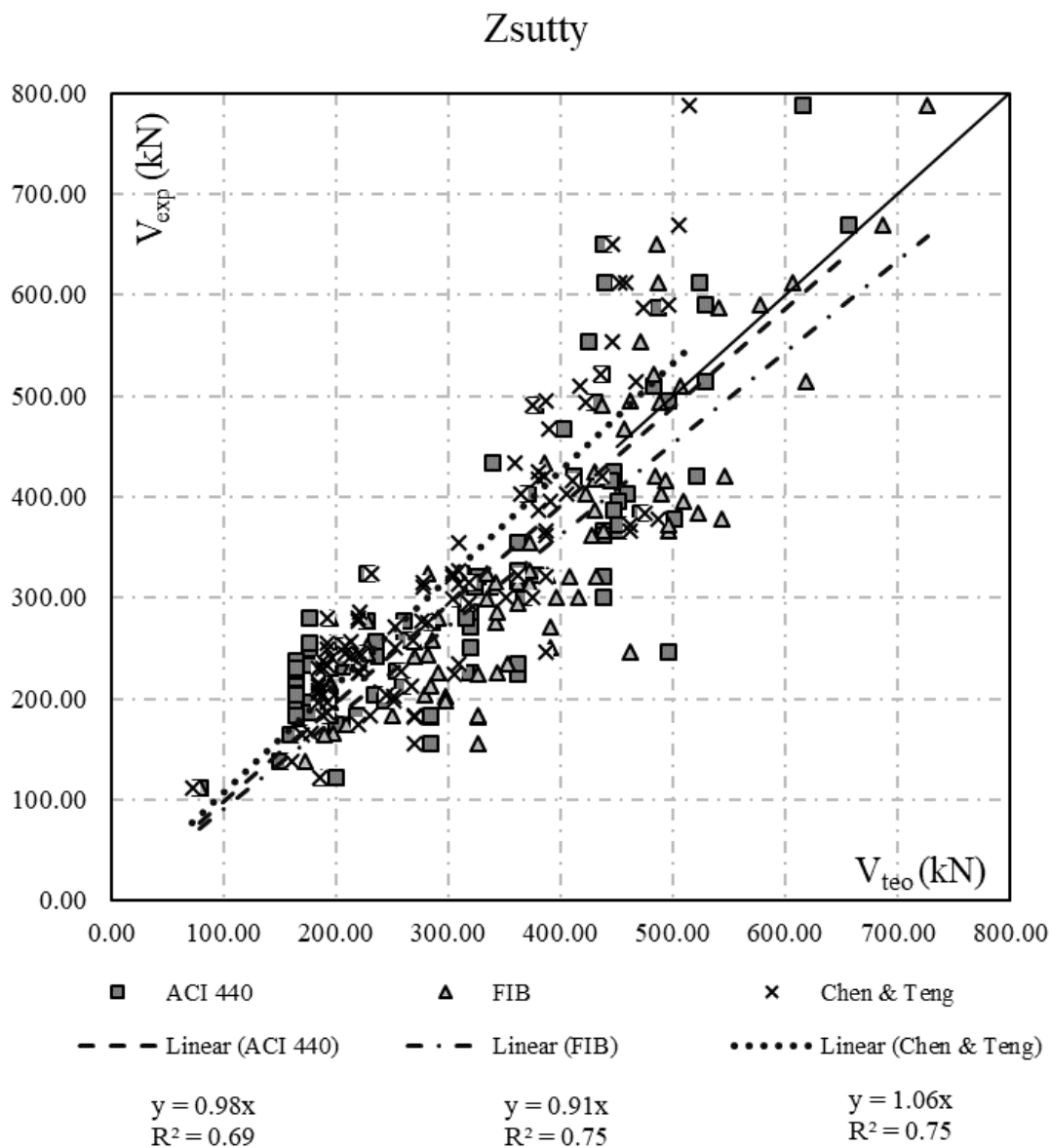


Figura 4-2c – Distribuição de resultados das combinações a partir de Z_{sutty} .

Ainda na parte de análise estatística, foi realizado um gráfico de diagrama de caixa que expressa a variabilidade de V_{exp} / V_{teo} para as 9 combinações de cálculo, conforme Figura 4-3.

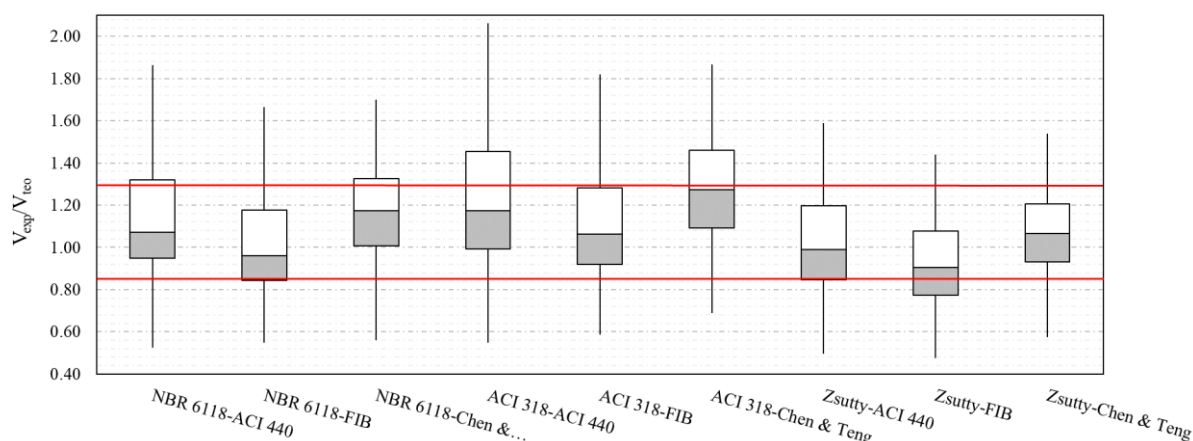


Figura 4-3 – Diagrama de Caixa de V_{exp}/V_{teo} por Combinação de Cálculo.

O diagrama de caixa, mostrado na Figura 4-3, divide os resultados de cada combinação em quatro quartis. A caixa central representa o segundo e terceiro quartis, e a linha que divide essa caixa central em duas partes distintas representa a média dos resultados calculados. As linhas horizontais vermelhas representam os limites inferior e superior da faixa considerada de segurança apropriada pelo Critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013), que são iguais a, respectivamente, 0,85 e 1,30.

É notável que as combinações realizadas a partir do ACI 318 geraram resultados mais conservadores, nos quais o terceiro quartil extrapolou o limite superior do Critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013), e a média dos resultados esteve acima da unidade.

Analisando as outras combinações, nota-se que a combinação NBR 6118-FIB, Zsutty-ACI 440 e Zsutty-Chen & Teng o segundo e terceiro quartil dentro dos limites do Critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013), mas a média de resultado da combinação Zsutty-ACI 440 esteve ligeiramente abaixo da unidade. Quanto à combinação Zsutty-Chen & Teng, essa apresentou uma menor dispersão dos quartis centrais em relação à outras, e ainda apresentou média acima da unidade.

Os resultados da análise pelo critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013), para cada combinação estão expostos na Figura 4-4. Por meio dela, verifica-se que as menores penalidades são aplicadas às combinações: NBR 6118-Chen & Teng e Zsutty-Chen & Teng.

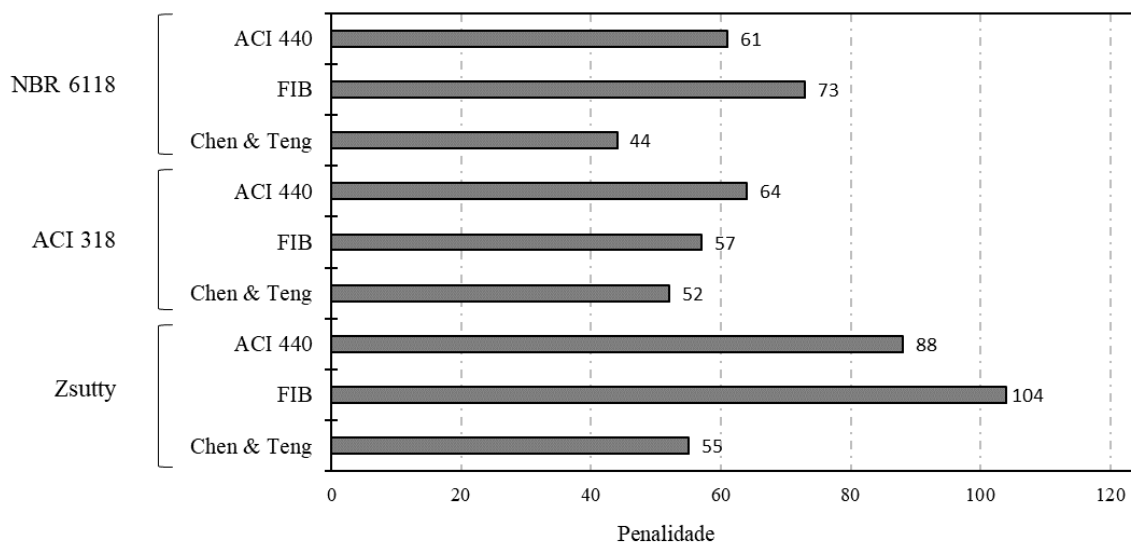


Figura 4-4 – Penalidade de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013), aplicada em cada combinação.

É importante, no entanto, verificar a distribuição de penalidade em cada combinação, uma vez que o método penaliza não apenas valores cuja relação V_{exp}/V_{teo} esteja abaixo da unidade. Essa distribuição de resultados está exposta na Figura 4-5. Por meio dela pode-se verificar que, no geral, as combinações a partir do ACI 318 geram poucos resultados abaixo da segurança apropriada, no entanto, há muitos resultados conservadores, como constatado pelo diagrama de caixa.

Verifica-se que a NBR 6118 apresenta menos conservadorismo que o ACI 318 e, também, uma distribuição melhor, como se pode verificar na combinação entre a NBR 6118-Chen & Teng, que não apresentou nenhum resultado na faixa “Extremamente Perigoso”, e apresentou apenas 1,0% de resultados na faixa “Perigoso” e 6,1% na faixa “Baixa Segurança”.

A partir de Zsutty começa a se observar uma maior quantidade de resultados abaixo da faixa de “segurança apropriada”, quando combinado com o ACI 440 e o FIB. No entanto, a combinação Zsutty-Chen & Teng não apresentou nenhum resultado na faixa “Extremamente Perigoso”, e apenas 1,0% de resultados na faixa “Perigoso”, mas 18,4% na faixa “Baixa Segurança”.

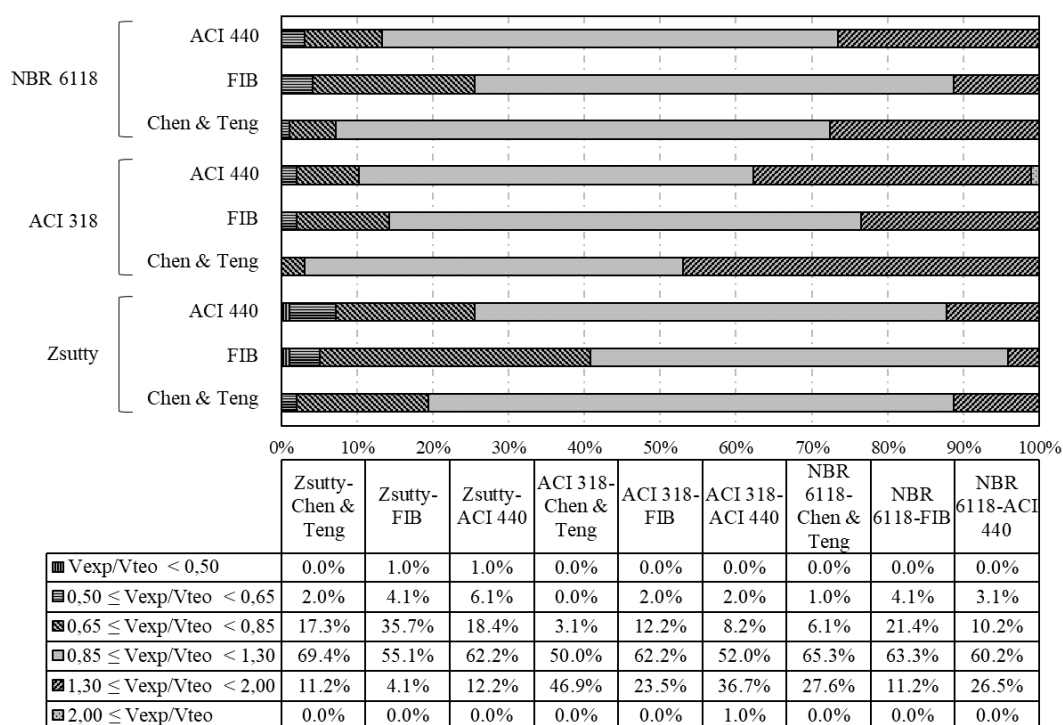


Figura 4-5 – Distribuição das vigas segundo o critério de COLLINS (2001), adaptado por MORAES (2013).

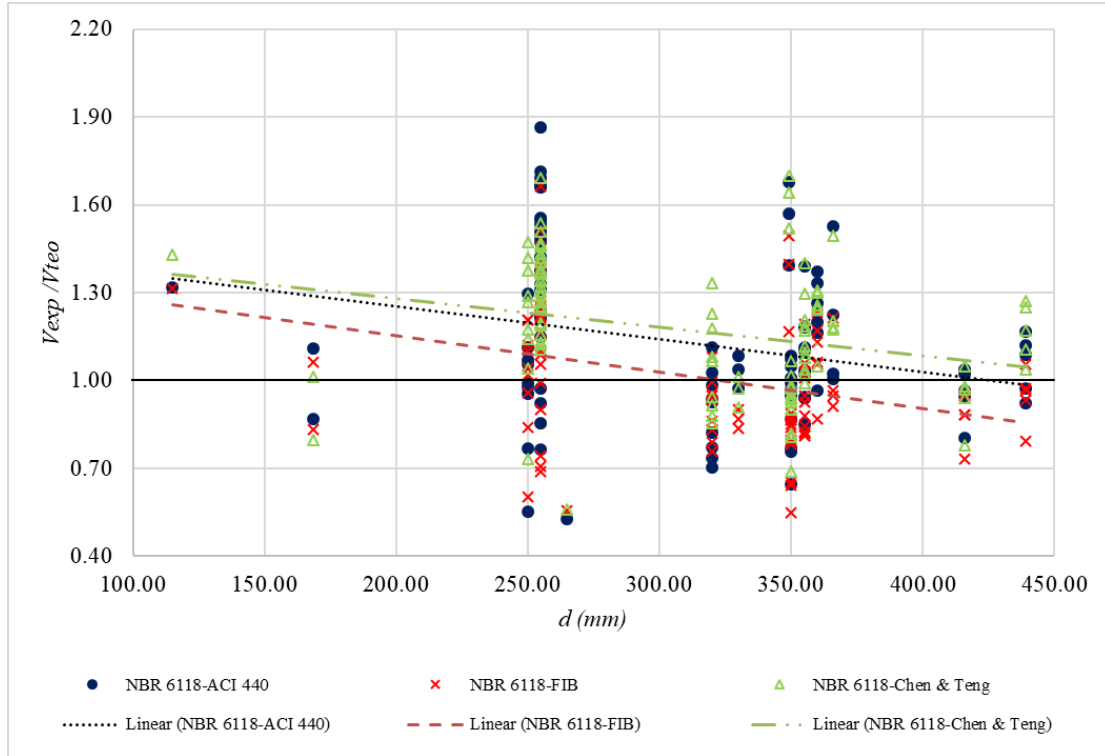
4.2. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Na segunda etapa de análises deste trabalho, foram selecionados parâmetros que influenciam no comportamento de vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC. O critério utilizado para a seleção desses parâmetros foi a relevância deles no comportamento das vigas expresso na relação V_{exp}/V_{teo} e o desconhecimento da variação desse comportamento para diferentes valores do parâmetro em questão.

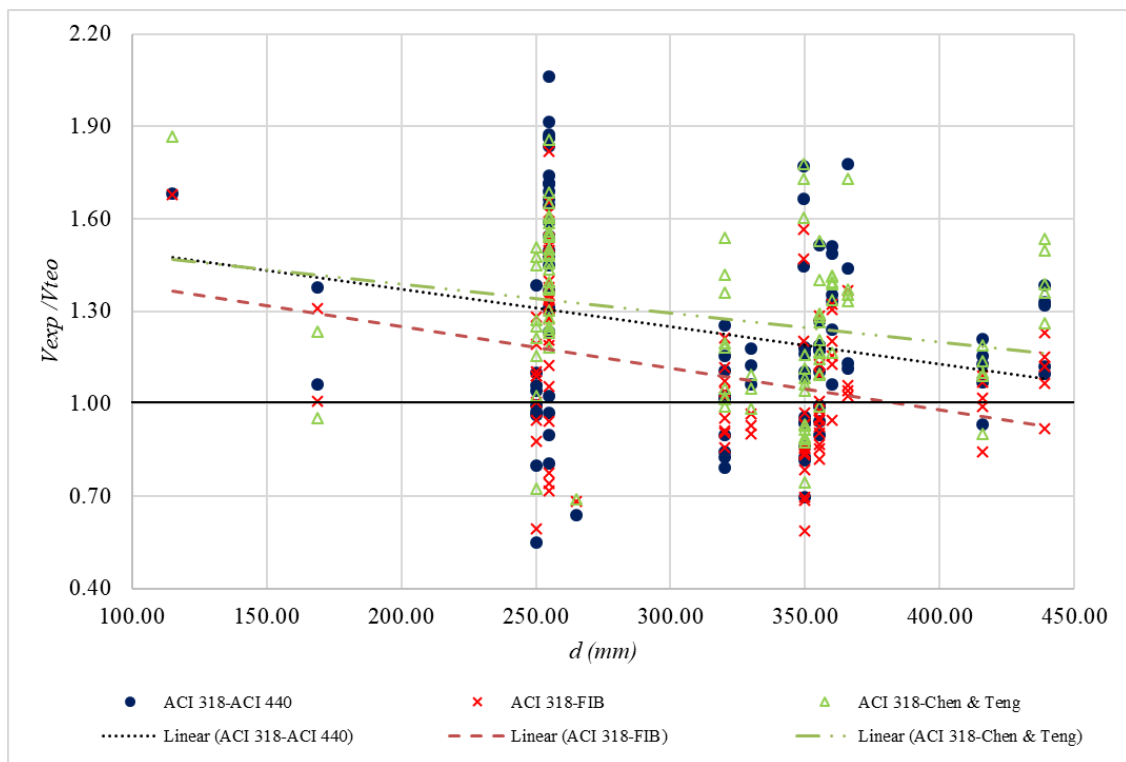
Os parâmetros analisados foram:

- Altura útil da viga (d)
- Relação a/d
- Resistência do concreto à compressão (f_c)
- Taxa de reforço na viga (ρ_f)
- Número de camadas de reforço

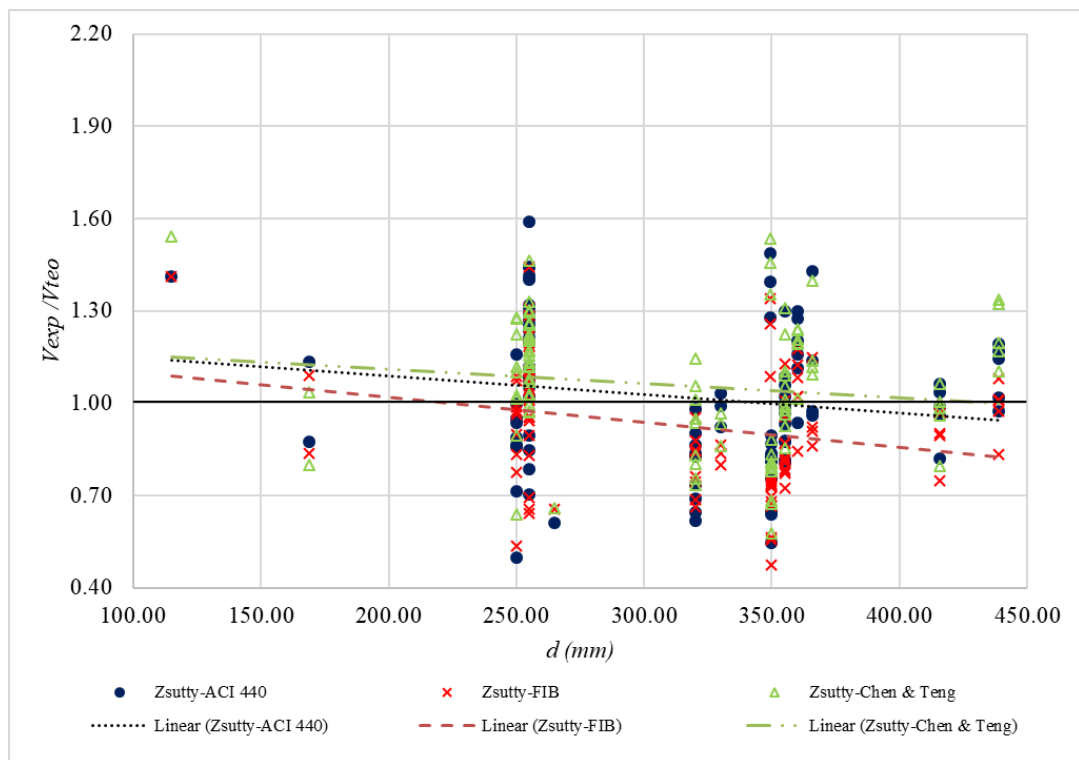
Essas variáveis foram analisadas por meio de gráficos de dispersão relacionando para cada viga reforçada do banco de dados a relação V_{exp}/V_{teo} obtida segundo cada combinação em função do valor da variável analisada. Os gráficos estão dispostos na Figura 4-6 à Figura 4-10.



(a) Resultado a partir das combinações da NBR 6118 com modelos de cálculo do reforço.



(b) Resultado a partir das combinações do ACI-318 com modelos de cálculo do reforço.



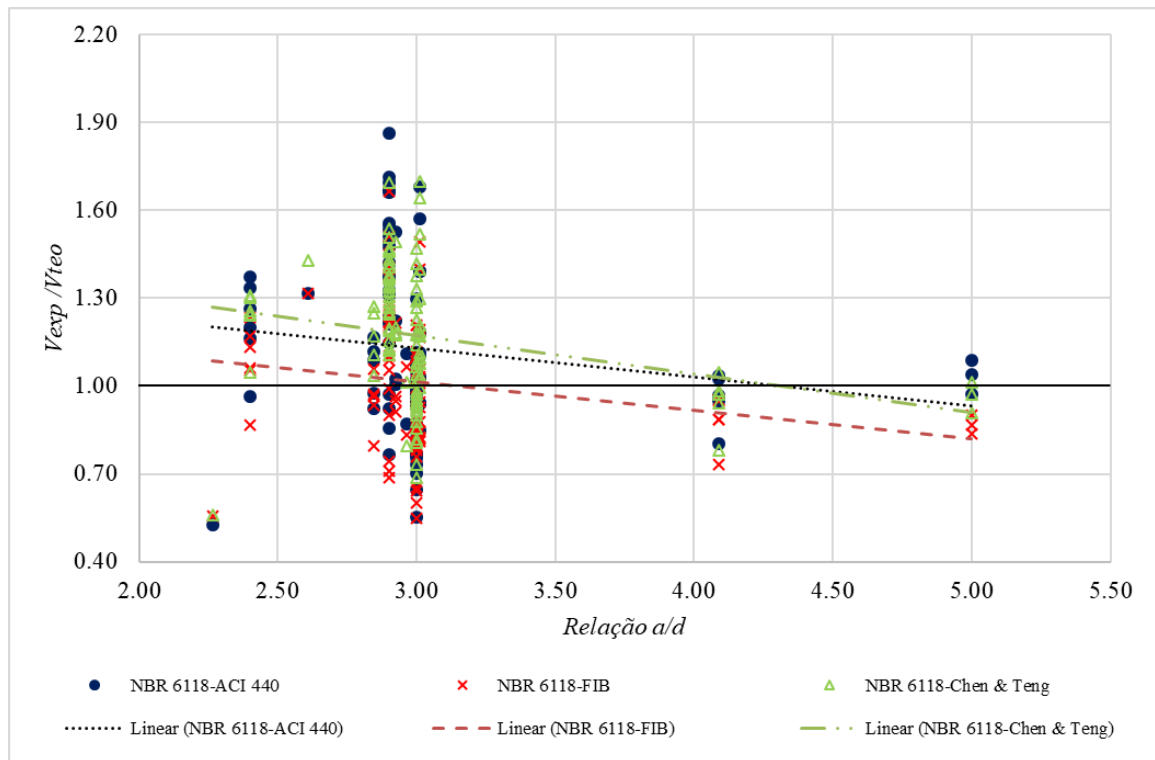
(c) Resultado a partir das combinações de Zsutty com modelos de cálculo do reforço.

Figura 4-6 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e d .

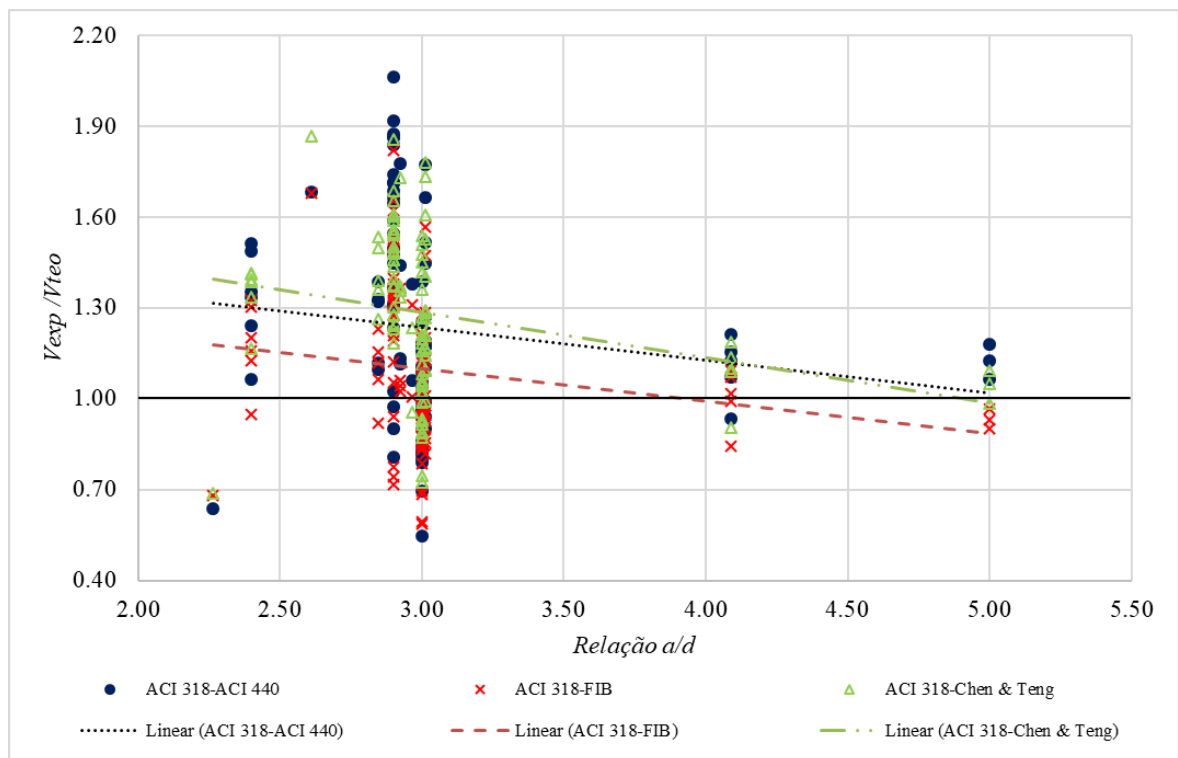
Os gráficos apresentaram grande dispersão para todas as variáveis analisadas. Isso se deve principalmente ao fato de a análise paramétrica ter sido realizada de forma conjunta, englobando vigas que possuem diferentes valores para várias variáveis que influenciam o seu comportamento, ou seja, o parâmetro analisado é apenas mais um entre diferentes variáveis cujos valores não são uniformes. Tal metodologia foi adotada por não se dispor de um banco de dados uniforme com apenas os valores dos parâmetros variando. Desta forma, no análise se limita apenas à comparação entre os resultados apresentados pelas diferentes combinações.

Apesar disso, conseguimos extrair algumas informações dos gráficos. Por meio dos gráficos da Figura 4-6 vemos que as combinações realizadas a partir de Zsutty geram os resultados menos conservados, em contraposição aos resultados das combinações realizadas a partir do ACI 318 e de Chen & Teng, cujas linhas de tendência lineares se mostraram em patamares superiores, expressando o maior conservadorismo desses métodos. Nota-se que as linhas de tendência geradas pelas combinações com o modelo de Chen & Teng são ligeiramente menos inclinadas que as demais, o que pode significar uma representação mais uniforme de d no modelo de Chen & Teng para diferentes valores de V_{exp}/V_{teo} , em relação aos outros modelos de cálculo.

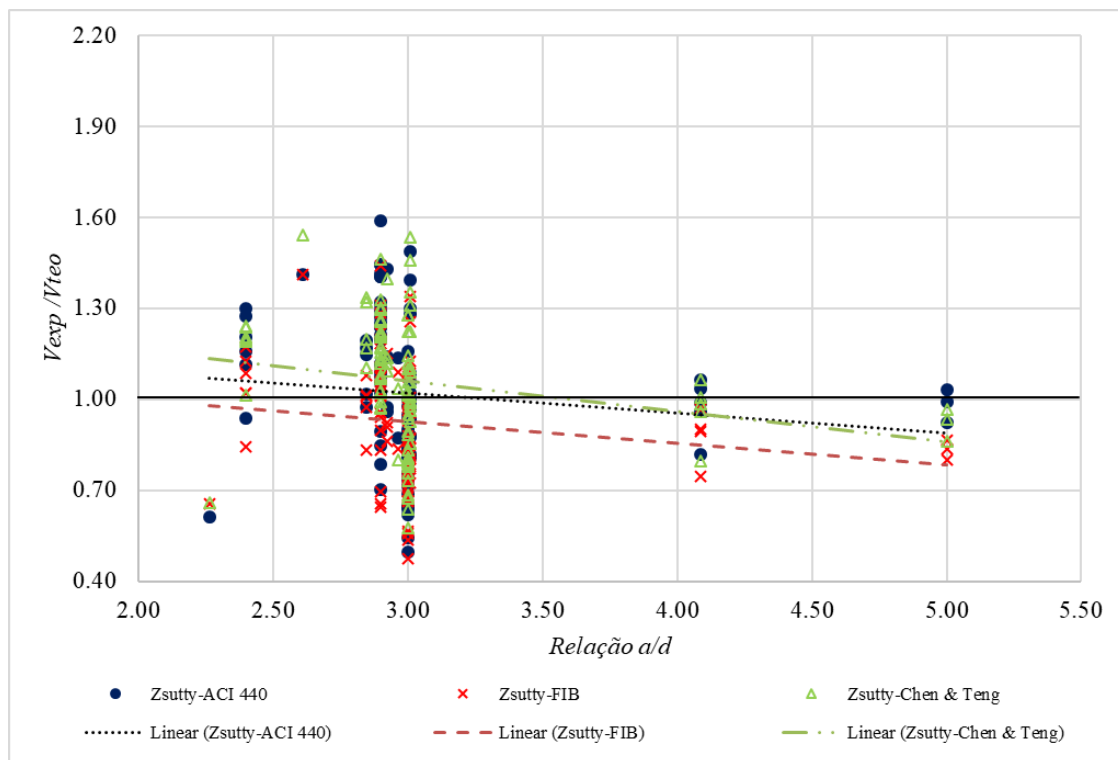
Os gráficos da Figura 4-7 comportam-se de maneira semelhante entre si. Nota-se que, neste caso, as linhas de tendência geradas pelas combinações com o modelo de Chen & Teng são ligeiramente mais inclinadas que as demais, o que pode significar uma representação menos uniforme de d no modelo de Chen & Teng para diferentes valores de V_{exp}/V_{teo} , em relação aos outros modelos de cálculo.



(a) Resultado a partir das combinações da NBR 6118 com modelos de cálculo do reforço.



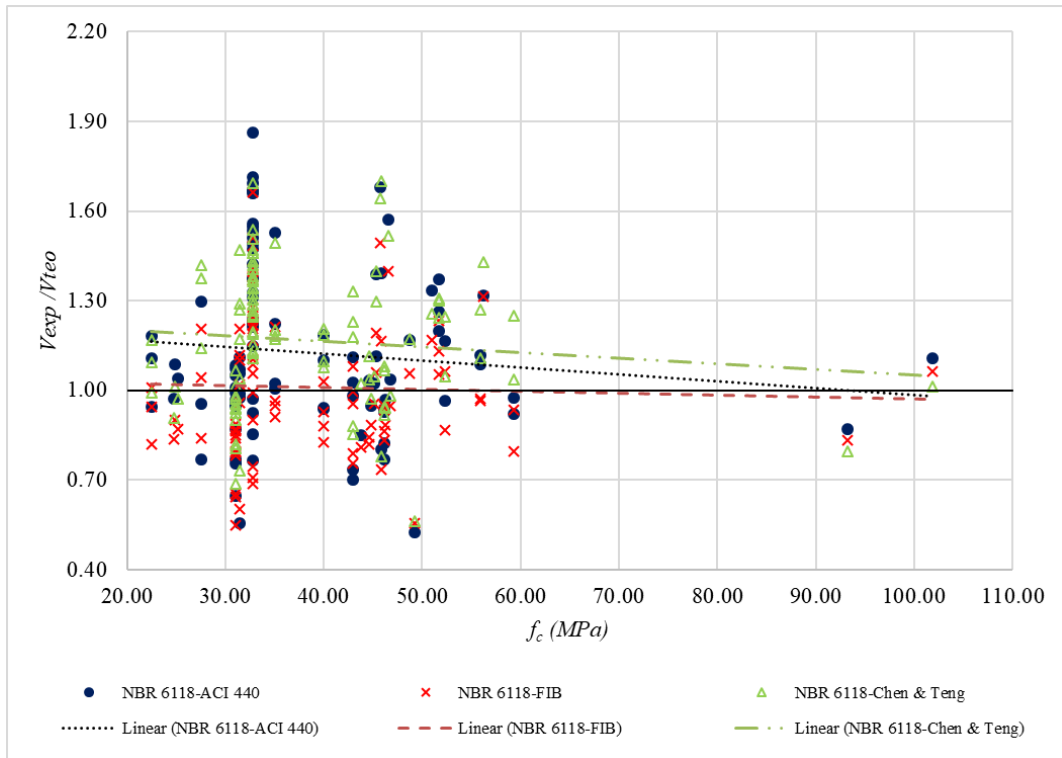
(b) Resultado a partir das combinações do ACI-318 com modelos de cálculo do reforço.



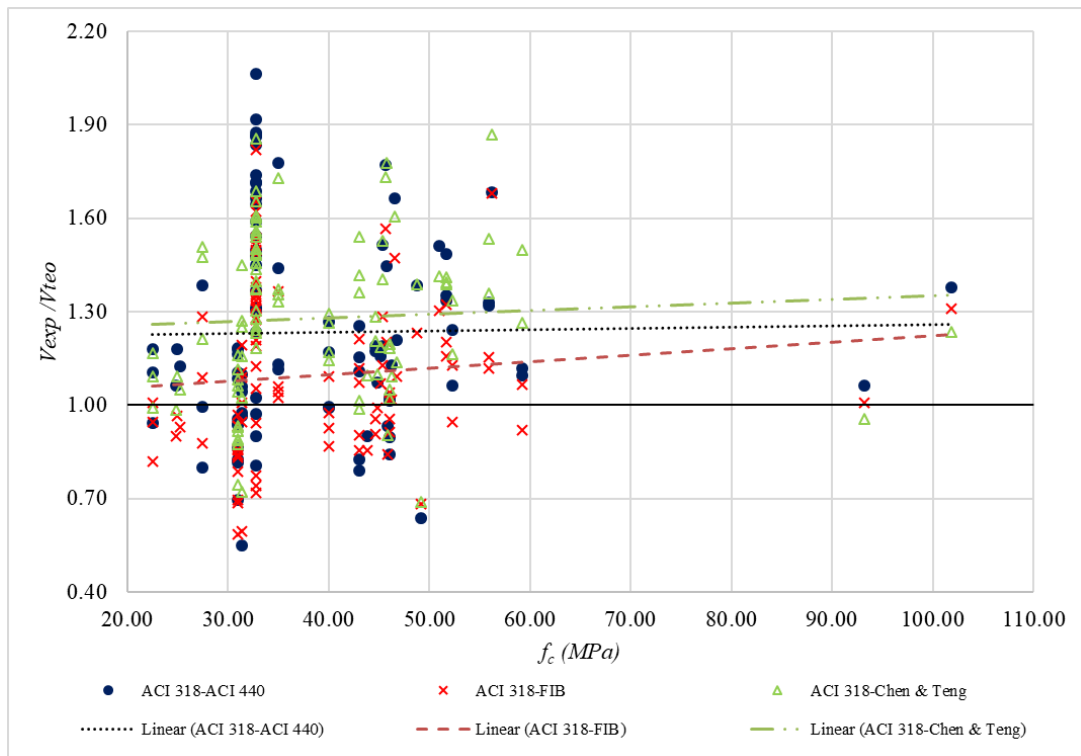
(c) Resultado a partir das combinações de Zsutty com modelos de cálculo do reforço.

Figura 4-7 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e a/d .

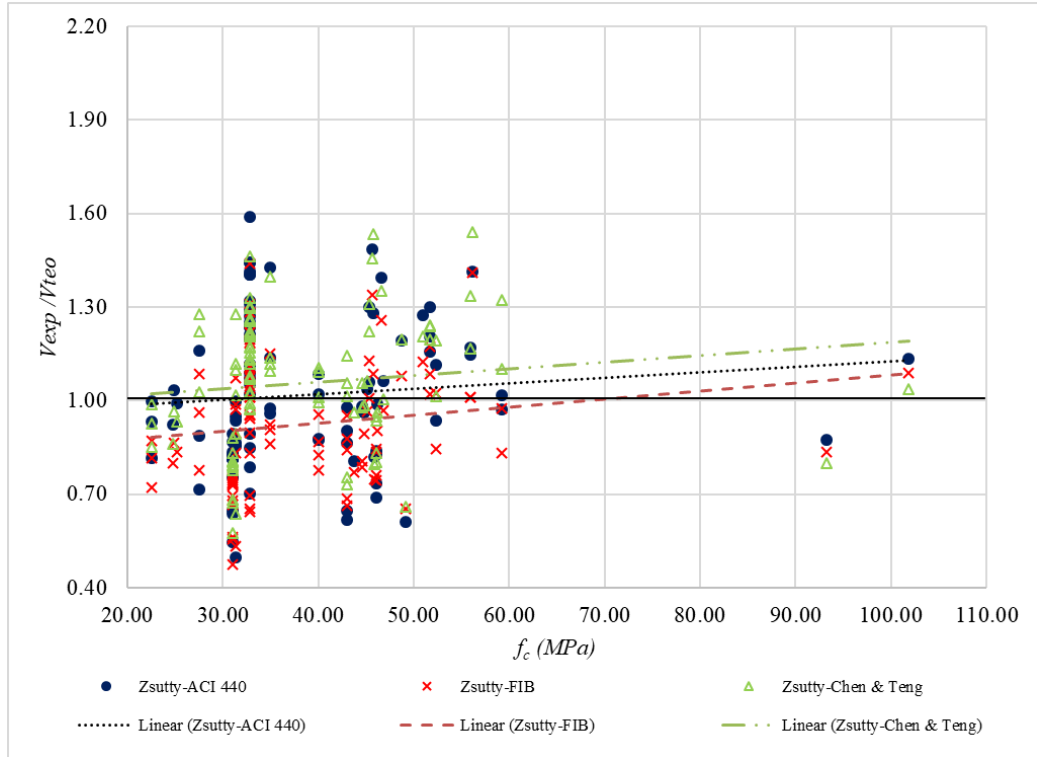
Nos gráficos da Figura 4-8 nota-se que para as combinações realizadas a partir da NBR 6118, as linhas de tendência foram descendentes, enquanto aquelas realizadas a partir do ACI 318 e de Zsutty foram ascendentes.



(a) Resultado a partir das combinações da NBR 6118 com modelos de cálculo do reforço.



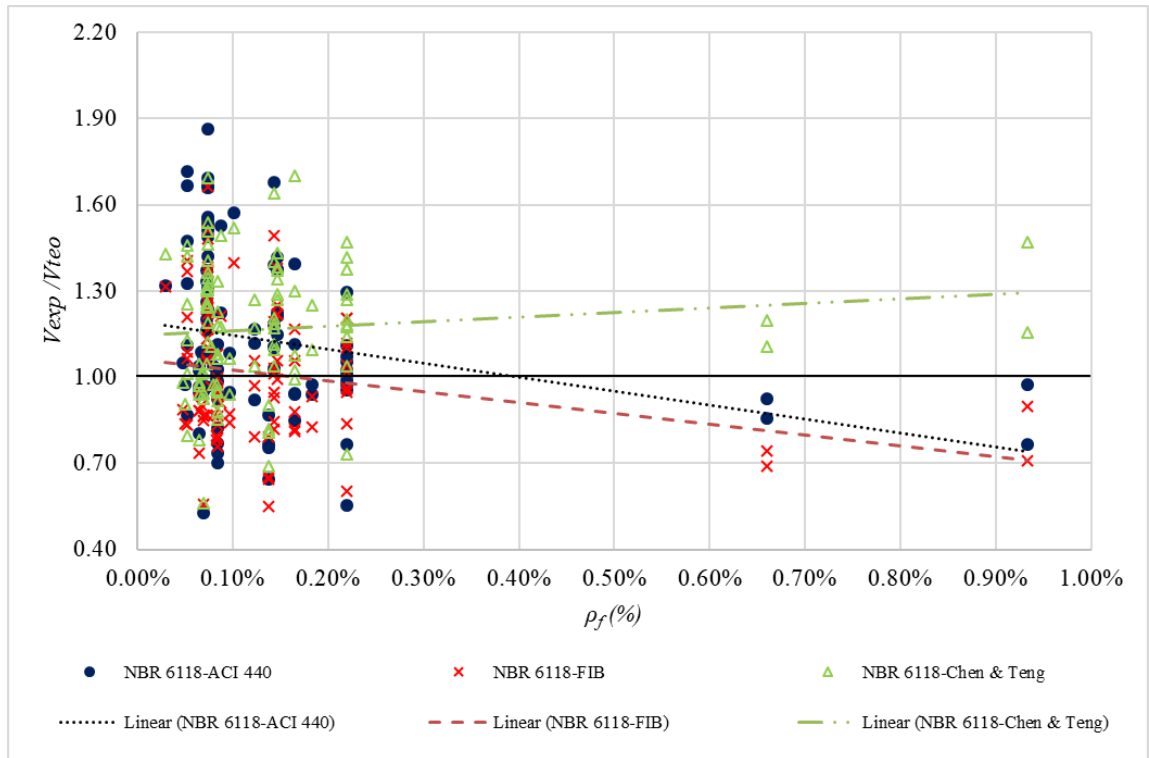
(b) Resultado a partir das combinações do ACI-318 com modelos de cálculo do reforço.



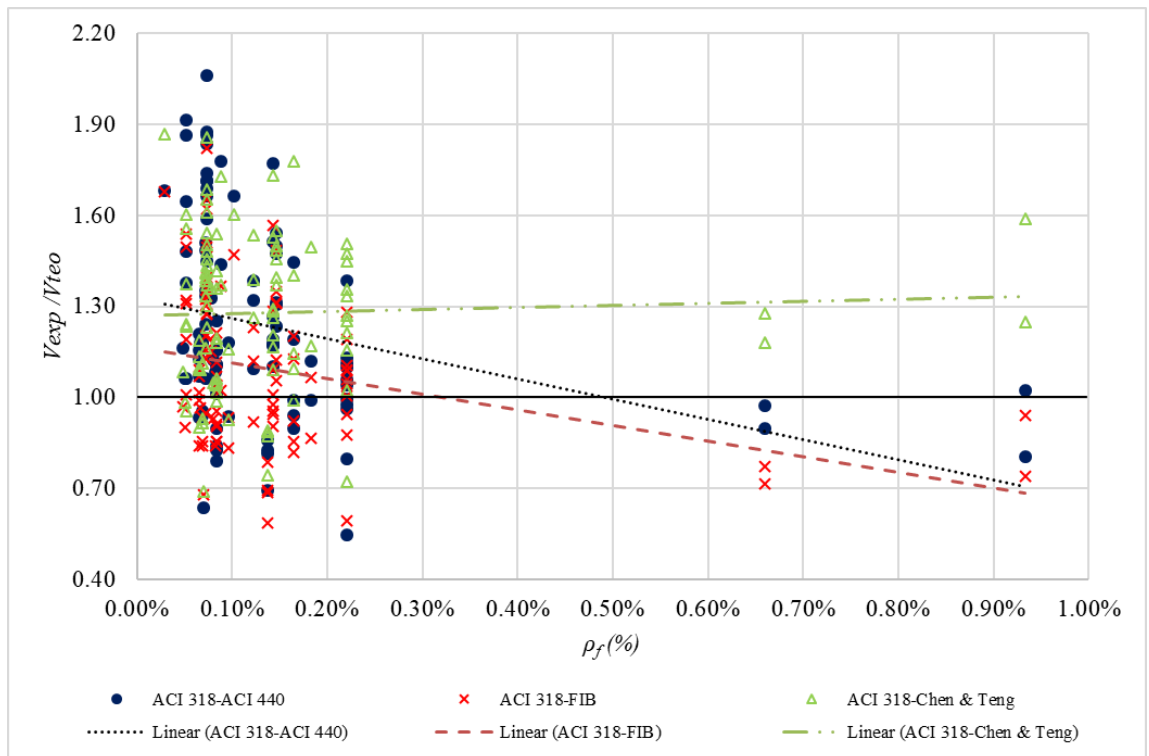
(c) Resultado a partir das combinações de Zsutty com modelos de cálculo do reforço.

Figura 4-8 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e f_c .

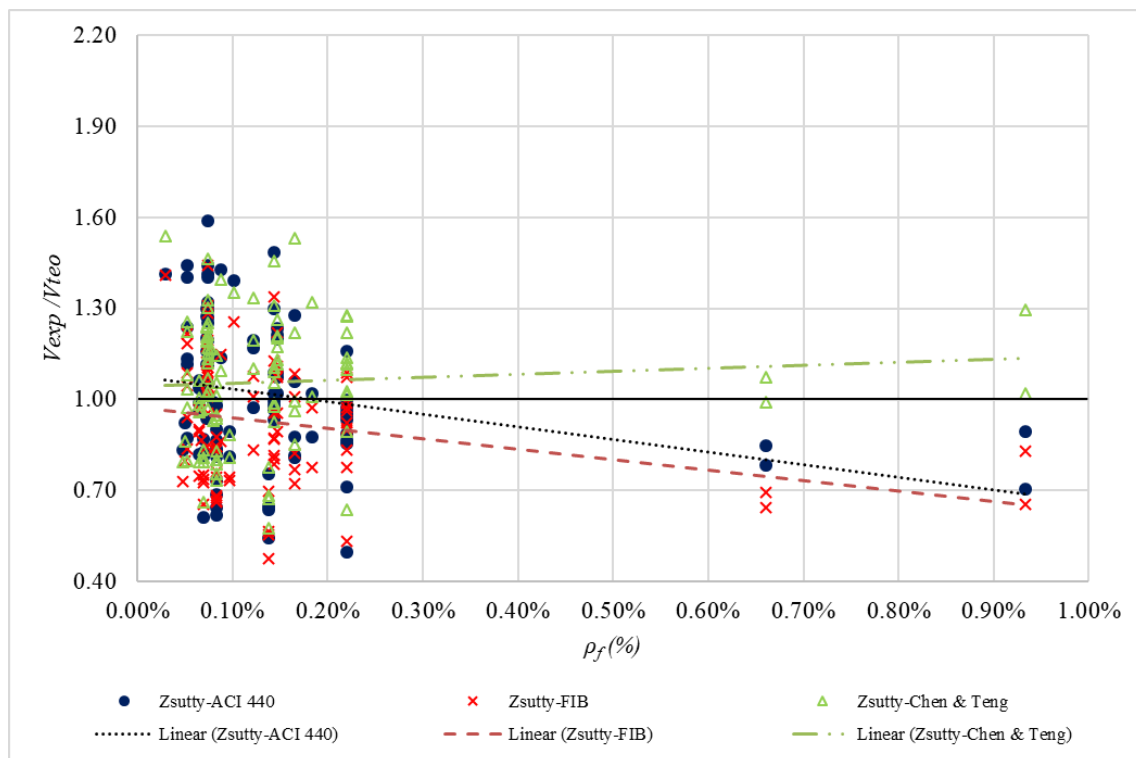
Nos gráficos da Figura 4-9 nota-se a grande diferença no comportamento das linhas de tendência geradas pelas combinações com o modelo de Chen & Teng, as quais apresentaram inclinação ascendente, com menor coeficiente de angular em módulo e com resultados em segurança adequada para altos valores de ρ_f .



(a) Resultado a partir das combinações da NBR 6118 com modelos de cálculo do reforço.



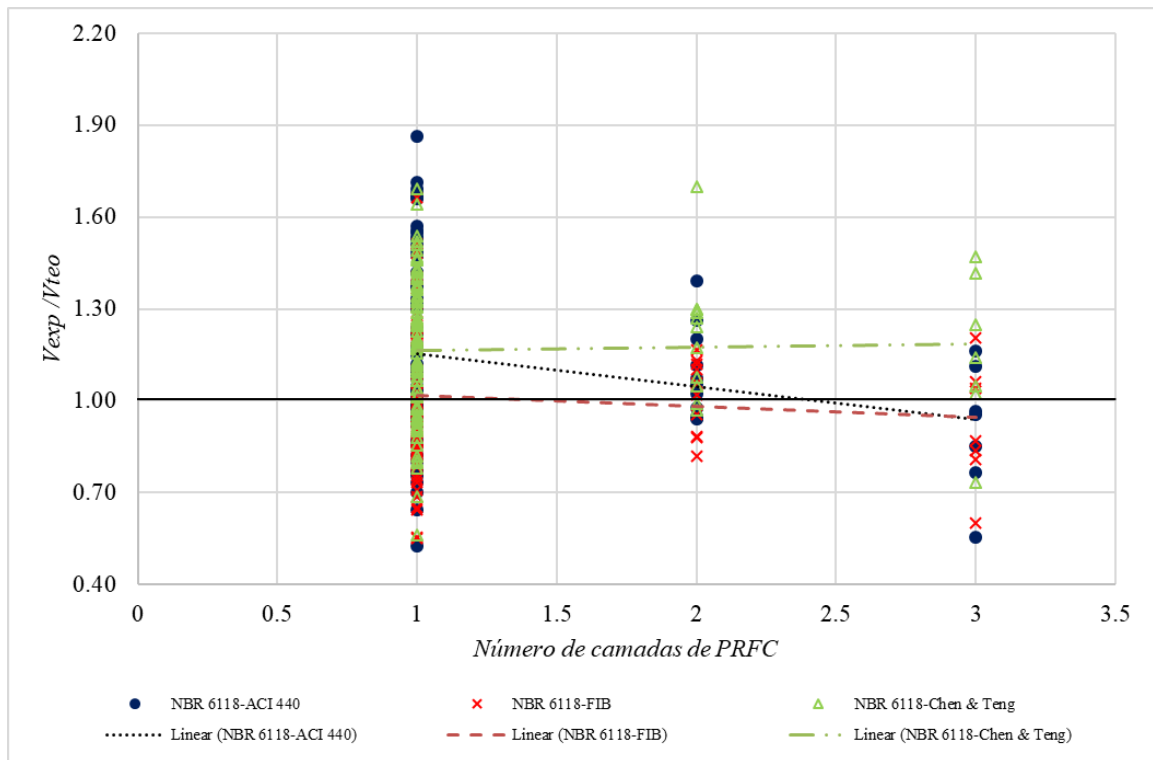
(b) Resultado a partir das combinações do ACI-318 com modelos de cálculo do reforço.



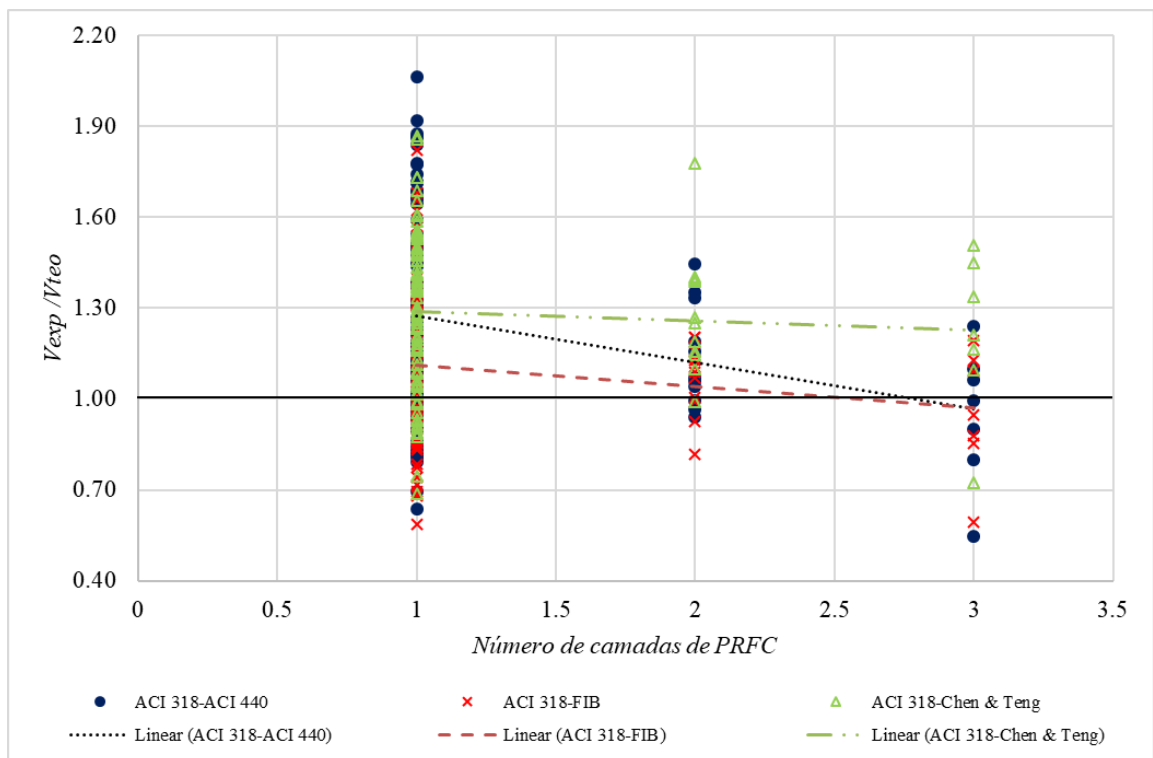
(c) Resultado a partir das combinações de Zsutty com modelos de cálculo do reforço.

Figura 4-9 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e ρ_f .

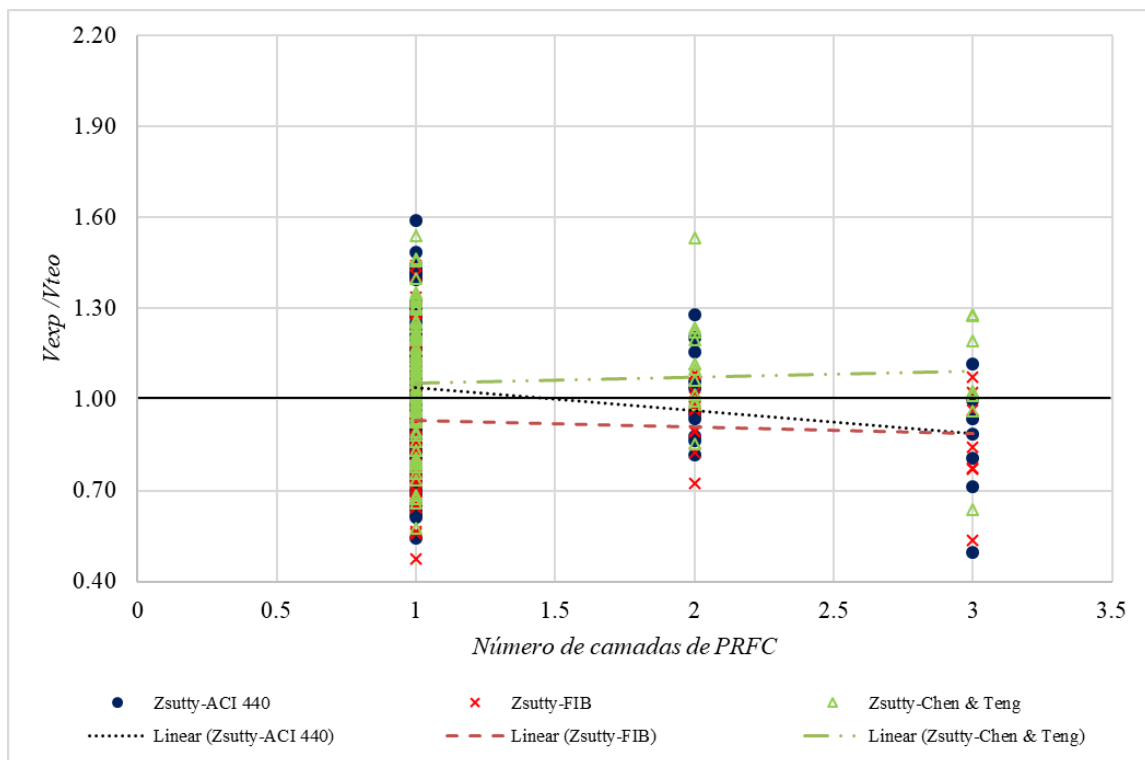
Os gráficos da Figura 4-10 apresentam comportamento geral semelhantes entre si, mas as linhas de tendência apresentam diferenças consideráveis. Pode-se notar que as combinações realizadas com o modelo de Chen & Teng mantém valores médios de V_{exp}/V_{teo} , acima de 1 para vigas com diferentes quantidades de camadas de reforço. Nota-se que as linhas de tendência realizadas a partir da combinação com os modelos do FIB e do ACI 440 são descendentes, o que pode ser um indício de que o aumento na relação V_{exp}/V_{teo} é, de certa forma, superestimado pelos modelos para um dado aumento na quantidade de camadas de reforço.



(a) Resultado a partir das combinações da NBR 6118 com modelos de cálculo do reforço.



(b) Resultado a partir das combinações do ACI-318 com modelos de cálculo do reforço.



(c) Resultado a partir das combinações de Zsutty com modelos de cálculo do reforço.

Figura 4-10 – Gráfico de dispersão entre V_{exp}/V_{teo} e o número de camadas de reforço.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que as combinações entre os modelos de cálculo da parcela de resistência ao cisalhamento provida pelo concreto e armadura transversal e os modelos de cálculo da resistência provida pelo reforço com PRFC podem ser utilizados efetivamente para prever a capacidade resistente real de uma viga reforçada, dentro das margens de erro de cada modelo.

Pôde-se observar que o ACI 318 é mais conservador na previsão da capacidade resistente ao cisalhamento provida pelo concreto e aço, em relação à NBR 6118 e ao modelo de Zsutty, sendo este o menos conservador. Quanto aos modelos de previsão da capacidade resistente provida pelo reforço, o modelo do FIB apresentou os resultados menos conservadores, enquanto o modelo de Chen & Teng foi o mais conservador. O modelo do ACI 440.2R apresentou resultados intermediários.

Combinando modelos, os melhores resultados observados foram resultantes das combinações NBR 6118-Chen & Teng e Zsutty-Chen & Teng, por terem aproximado os resultados experimentais da previsão teórica com maior acurácia e, além disso, terem apresentado mais resultados a favor da segurança sem, no entanto, apresentarem tanto conservadorismo quanto as combinações obtidas a partir do ACI 318.

A combinação Zsutty-Chen & Teng apresentou mais resultados contra a segurança que a combinação NBR 6118-Chen & Teng, que por sua vez apresentou melhores resultados em relação às outras combinações, considerando os parâmetros e aspectos aqui avaliados e pontuados. Cabe ressaltar que a combinação Chen & Teng apresentou bons resultados em todas as combinações. Isso resulta de uma série de fatores que são levados em consideração neste modelo de cálculo do reforço.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir das recomendações de estudos sugeridas pelas pesquisas analisadas neste trabalho e por meio dos resultados obtidos a partir das análises realizadas, foi sugerido um programa experimental afim de dar continuidade à linha desta pesquisa. Portanto, o programa proposto apresenta vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com PRFC e submetidas a ensaio de 4 pontos, conforme a viga apresentada na Figura 2-9.

O programa proposto visa estudar a influência da taxa de armadura de cisalhamento (ρ_{sw}) no reforço de uma viga ao cisalhamento, a sua influência sobre a relação V_{exp}/V_{teo} de diferentes modelos e sobre o comportamento de vigas reforçadas. Por meio deste estudo, sugere-se avaliar a eficiência do reforço com CFRP em diferentes taxas de armadura de cisalhamento. Os espécimes sugeridos para essas análises possuem diferentes valores de taxa de armadura e foram denominados como Grupo A. Suas características estão dispostas na Tabela 6.1 à Tabela 6.3.

Além do estudo da taxa de armadura, propõe-se aqui o estudo da influência do número de camadas de reforço (n) na resistência final da viga reforçada. A análise paramétrica realizada nos dá indícios de que alguns modelos teóricos podem superestimar a influência do número de camadas na resistência final. Desta forma, foram sugeridos espécimes com diferentes valores de n para estudo do comportamento de vigas em função deste parâmetro. Esses espécimes foram denominados Grupo B e suas características estão apresentadas na Tabela 6.1 à Tabela 6.3.

Foi, ainda, proposto o ensaio de uma viga de referência, sem reforço com PRFC.

Por fim, na Tabela 6.4 estão apresentadas as resistências ao cisalhamento das vigas, calculadas segundo a combinação NBR 6118-Chen & Teng, que apresentou os melhores resultados na análise realizada neste trabalho. A partir dos dados experimentais, sugere-se análises do comportamento das vigas reforçadas.

Tabela 6.1 – Características gerais das vigas propostas.

Grupo	Espécime	Características geométricas das vigas							Concreto		Arm. flexão		Arm. Cisalhamento						
		Seção Trans.	b_w (mm)	b_f (mm)	h (mm)	d (mm)	a/d	vão (mm)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	A_s (cm ²)	ρ_s (%)	α (°)	ϕ (mm)	@ (cm)	A_{sw}/s (cm ² /m)	ρ_{sw} (%)	f_{yw} (MPa)	f_u (MPa)
-	V-1	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	4.2	17	1.63	0.11%	600	812
Grupo A	VA-1	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	4.2	20	1.39	0.09%	600	812
	VA-2	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	4.2	14.5	1.91	0.13%	600	812
	VA-3	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	4.2	11.5	2.41	0.16%	600	812
	VA-4	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	5	13.5	2.91	0.19%	600	812
	VA-5	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	5	11.5	3.41	0.23%	600	812
	VA-6	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	5	10	3.93	0.26%	600	812
Grupo B	VB-1	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	4.2	17	1.63	0.11%	600	812
	VB-2	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	4.2	17	1.63	0.11%	600	812
	VB-3	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	15.46	2.86%	90.0	4.2	17	1.63	0.11%	600	812
	VB-4	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	18.85	3.49%	90.0	4.2	17	1.63	0.11%	600	812
	VB-5	T	150	550	400	360	3.06	3000	40.0	31,699	18.85	3.49%	90.0	4.2	17	1.63	0.11%	600	812

Tabela 6.2 – Características da armadura de flexão das vigas propostas.

Grupo	Espécime	Características barras 1ª camada				Características barras 2ª camada				Carga de ruptura	
		Bitola (mm)	A_s (mm ²)	nº de barras	f_y (MPa)	Bitola (mm)	A_s (mm ²)	nº de barras	f_y (MPa)	M_u (kNm)	P_u (kN)
-	V-1	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
Grupo A	VA-1	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VA-2	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VA-3	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VA-4	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VA-5	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VA-6	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
Grupo B	VB-1	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VB-2	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VB-3	20.0	314.16	3	500.00	16.0	201.06	3	619.00	284.99	518.16
	VB-4	20.0	314.16	3	500.00	20.0	314.16	3	619.00	349.93	636.23
	VB-5	20.0	314.16	3	500.00	20.0	314.16	3	619.00	349.93	636.23

Tabela 6.3 – Características do reforço das vigas propostas.

<i>Grupo</i>	<i>Espécime</i>	E_f (MPa)	n	t_f (mm)	w_f (mm)	s_f (mm)	α_f (°)	ε_{fu}	ρ_f (%)	d_f (mm)	d_f' (mm)	<i>Mét. Ref.</i>
-	V-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grupo A	VA-1	228,000	1	0.165	150	230	90	0.017	0.143%	255.2	100.00	U
	VA-2	228,000	1	0.165	150	230	90	0.017	0.143%	255.2	100.00	U
	VA-3	228,000	1	0.165	150	230	90	0.017	0.143%	255.2	100.00	U
	VA-4	228,000	1	0.165	150	230	90	0.017	0.143%	255.2	100.00	U
	VA-5	228,000	1	0.165	150	230	90	0.017	0.143%	255.2	100.00	U
	VA-6	228,000	1	0.165	150	230	90	0.017	0.143%	255.2	100.00	U
Grupo B	VB-1	228,000	1	0.165	150	230	90	0.017	0.143%	255.2	100.00	U
	VB-2	228,000	2	0.165	150	230	90	0.017	0.287%	255.2	100.00	U
	VB-3	228,000	3	0.165	150	230	90	0.017	0.430%	255.2	100.00	U
	VB-4	228,000	4	0.165	150	230	90	0.017	0.574%	255.2	100.00	U
	VB-5	228,000	5	0.165	150	230	90	0.017	0.717%	255.2	100.00	U

Tabela 6.4 – Resistência ao cisalhamento das vigas propostas, segundo a combinação NBR 6118-Chen & Teng.

<i>Grupo</i>	<i>Espécime</i>	$V_{u,teo}$ (kN)
-	V-1	223
Grupo A	VA-1	309
	VA-2	330
	VA-3	349
	VA-4	368
	VA-5	388
	VA-6	408
Grupo B	VB-1	319
	VB-2	319
	VB-3	319
	VB-4	319
	VB-5	319

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 2014. *NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. s.l.:s.n.

ACI, 2011. *ACI 318M-11 - Building Code Requirements for Structural Concrete*. s.l.:s.n.

ACI, 2017. *ACI 440.2R-17 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. s.l.:s.n.

AKROUSH, e. a., 2016. CFRP shear strengthening of reinforced concrete beams in zones of combined shear and normal stresses.

ALTIN; et al., 2010. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(19/2010).

ARAÚJO, A. S. D., 2002. *Reforço ao cisalhamento de vigas T de concreto armado com fibra de carbono com dois tipos de ancoragem*. Brasília: Universidade de Brasília.

BARROS & DIAS, 2003. Shear strengthening of reinforced concrete beams with laminate strips of CFRP.

BEBER, A. J., 2003. *Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono*. Porto Alegre: Tese de Doutorado em Engenharia. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

BUKHARI, e. a., 2010. Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP.

CARVALHO, e. a., 2015. *Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado*. 4ª ed. São Carlos: EdUFSCar.

CHEN, G.M.; et al., 2016. T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips. *Composite Structures*.

CHEN, J. F. & TENG, J. G., 2003. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams - FRP rupture. *Construction and Building Materials*.

CHEN, J. F. & TENG, J. G., 2003. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*.

COLLINS, M. P., 2001. Evaluation of shear design procedures for concrete structures. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design..

fib (CEB_FIP), 2001. *fib - Bulletin 14 - Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. s.l.:s.n.

FIB, C., 2001. *Bulletin 14 - Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures - Technical Report*. s.l.:s.n.

- FILHO, J. N. D. S., 2001. *Vigas T em concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono*. Brasília: Universidade de Brasília.
- GALLARDO, G. D. O., 2002. *Reforço ao esforço cortante em vigas de concreto aplicando-se folhas flexíveis de fibra de carbono pré-impregnadas*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- GALVEZ, L. E. M., 2003. *Reforço estrutural à força cortante em vigas de concreto armado por meio de colagem externa de mantas flexíveis de fibras de carbono (PRFC)*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- KHALIFA, AHMED; et al., 2000. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. *Cement & Concrete Composites*.
- KHALIFA, e. a., 1998. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members.
- Loturco, B., 2017. *Téchne Pini*. [Online]
Available at: <https://techne.pini.com.br/2017/05/saiba-tudo-sobre-reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono/>
- MACHADO, A. d. P. & MACHADO, B. A., 2015. *Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compostos FRP - Teoria & Prática*. s.l.:PINI.
- MENDOÇA, P. D. T. R., 2005. *Materiais Compostos e Estruturas–Sanduíche: Projeto e Análise*. Barueri, São Paulo: Manole.
- MOFIDI & CHAALLAL, 2011. Shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites effect of strip-width-to-strip-spacing ratio. *Journal of Composites for Construction - ASCE*.
- MOLINA, J. L., 2013. *Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono*. Valencia: Universitat Politècnica de València. Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación - Escola Tècnica Superior de Gestió en l'Edificació .
- MORAES NETO, B. N., 2013. *Comportamento à punção de lajes lisas em concreto reforçado com fibras de aço sob carregamento simétrico..* Brasília: Universidade de Brasília.
- NETO, M. S., 2000. *Comportamento ao cisalhamento de vigas “T” de concreto armado reforçadas com compósito de fibra de carbono*. Brasília: Universidade de Brasília.
- PELLEGRINO & MODENA, 2002. Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement. *Journal of Composites for Construction*.

PÉREZ, A. F., 2016. *Reforço de vigas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (PRFC)*. s.l.:s.n.

REBEIZ, K. S., 1999. Shear strength prediction for concrete members. *Journal of Structural Engineering*, 125(3).

SHACKELFORD, J. F., 2008. *Ciência dos Materiais*. 6ª ed. São Paulo: PEARSON.

Site AltoQi, 2010. *AltoQi*. [Online]

Available at: http://faq.altoqi.com.br/content/268/653/pt-br/dimensionamento-de-vigas-ao-cisalhamento-_nbr-6118_2007.html

Site: Reforço de Estruturas, 2016. *Reforço de Estruturas*. [Online]

Available at: www.reforcodeestruturas.com.br

Site: Viapol, 2016. [Online]

Available at: www.viapol.com.br

Site: Zaldigain, 2016. [Online]

Available at: www.zaldigain.com

SPAGNOLO; et al., 2013. Vigas T de concreto armado reforçadas à força cortante com compósito de fibras de carbono. Volume 6.

SWAMY, R. N. & MUKDHOPADHYAYA, P., 1999. *Debonding of carbon-fibre-reinforced polymer plate from concrete beams*. s.l.:s.n.

TÄLJSTEN, B., 2003. Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. *Construction and Building Materials*.

TENG, C. A., 2008. Shear strengthening of reinforced concrete (RC) beams with fibre-reinforced polymer (FRP) composites.

ZSUTTY, T. C., 1968. Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data.